

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS, MODELOS E EQUIPAMENTO NO PROCESSO DE SECAGEM DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

RICARDO MIGUEL DE MIRANDA MARINHO GOMES MONTEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professor Doutor João Manuel do Paço Quesado Delgado

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, à minha irmã e à minha namorada

“A curiosidade é mais importante que o conhecimento.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação com a colaboração indispensável de algumas pessoas contribuiu para o seu resultado final, e a quem não posso deixar de manifestar o meu profundo e sincero agradecimento.

- Em primeiro lugar, agradeço à minha orientadora Professora Doutora Eva Barreira pela sua ajuda, sobretudo pela sua paciência e compreensão ao longo desta tese, e ao meu coorientador Professor Doutor João Delgado pela sua inteira disponibilidade no esclarecimento de todas as dúvidas.

- A todos os que, direta ou indiretamente, estiveram envolvidos na elaboração desta dissertação.

- Aos meus pais e à minha irmã que, apesar de tempos mais difíceis, sempre me apoiaram e incentivaram.

- Por último, um agradecimento muito especial à minha namorada Cristiana, por me ajudar em tudo o que pôde e todo o apoio e carinho incondicional que me tem dado desde sempre.

RESUMO

A secagem é um processo na construção que influencia a qualidade e a durabilidade de um determinado elemento construtivo.

O processo de secagem passa por retirar a água do interior de um material poroso por via de transferência de massa, que ocorre por ação de uma fonte energética que incide no material. A secagem está presente na construção, sendo mesmo um dos processos mais importantes nesta indústria.

A secagem consiste nas transferências de calor e humidade que um determinado material sofre. Quando a energia sob a forma de calor incide no material, este sofre transferências internas e à superfície, que lhe permitem expulsar a humidade presente na sua estrutura. O conhecimento dos fatores que influenciam este processo é fundamental para a obtenção de um produto melhor e otimizado. Para isso, o estudo das fases e da cinética de secagem são abordados neste trabalho.

Para a análise desse estudo, foi feita uma revisão bibliográfica sobre artigos que abordam a cinética de secagem de materiais de construção. Pretendeu-se saber qual a influência de certos parâmetros, como a velocidade do ar, a temperatura do ar, a humidade relativa do ar e a estrutura porosa do material, têm no tempo e a otimização da secagem de um material. Foram também analisados artigos que estudaram a influência de diferentes métodos de secagem, recorrendo a diferentes tipos de secador.

PALAVRAS-CHAVE: Secagem, Materiais de construção, Taxa de secagem, Cinética de secagem, Modelos de secagem.

ABSTRACT

The drying is a construction process that influences the quality and the durability of a certain construction element.

The drying process consists on removing the interior water of a porous material by mass transfer that it happens following an energetic source that collides into the material. The drying is one of the most important processes of construction industry.

The drying process resides on the heat and humidity transfers that a specific material suffers. When the heat energy collides with some material, this one suffers an internal and superficial transfer that allows him to expulse the structure humidity. The knowledge of the major factors of the drying process is fundamental to obtain a better and optimized product. Therefore the phase and drying kinetics study is analysed at this work.

To complete this analyse, it was made a bibliographic revision about drying kinetics on construction materials articles. The goal was to know the influence of parameters, like the air velocity, the air temperature, the air relative humidity and the porous structure of the material, on the drying product time and optimization. It was also analysed some articles about different dryers and drying mechanisms used to a certain material.

KEYWORDS: Drying, Construction materials, Drying rate, Drying kinetics, Drying models.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DA DISSERTAÇÃO	2
2. FUNDAMENTOS DA SECAGEM	3
2.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS	3
2.2. MECANISMO DE SECAGEM	3
2.2.1. DEFINIÇÃO DE SECAGEM	3
2.2.2. CONCEITOS TEÓRICOS	4
2.2.2.1. Características gerais	4
2.2.2.2. Transferência de energia	8
2.2.2.3. Transferência de humidade	10
2.3. FASES DE SECAGEM	14
2.4. CINÉTICA DE SECAGEM	17
2.4.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS	17
2.4.2. CONSTATANTE DE SECAGEM	18
2.4.3. MODELOS MATEMÁTICOS	20
2.5. MÉTODOS E EQUIPAMENTOS DE SECAGEM	24
2.5.1. SECADORES POR CONVECÇÃO	24
2.5.1.1. "Batch" – Descontínuos	24
2.5.1.2. Contínuos	25
2.5.2. SECADORES POR CONDUÇÃO	28
2.5.2.1. "Batch" – Descontínuos	28
2.5.2.2. Contínuos	39
2.5.3. SECADORES POR RADIAÇÃO	30
2.6. SECAGEM NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	30
2.6.1. BETÃO	30
2.6.2. MADEIRA	31
2.6.3. ARGILA	32
2.6.4. GESSO	33

2.6.5. ARGAMASSAS.....	34
------------------------	----

3. SECAGEM EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO 35

3.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS.....	35
-------------------------------	----

3.2. ANÁLISE CRÍTICA SOBRE A APLICAÇÃO DE SECAGEM EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO..... 35

3.2.1. "DRYING KINETICS OF SOME BUILDING MATERIALS"	35
---	----

3.2.2. "DRYING KINETICS OF SELF-COMPACTING CONCRET"	38
---	----

3.2.3. "SIMPLE METHOD TO APPROXIMATE LIQUID TRANSPORT COEFFICIENTS DESCRIBING THE ABSORPTION AND DRYING"	41
--	----

3.2.4. "CONTRACTION CHARACTERISTICS OF MOLDED CERAMICS DURING DRYING"	42
---	----

3.2.5. "DRYING ENHANCEMENT OF CLAY SLAB BY MICROWAVE HEATING"	44
---	----

3.2.6. "DRYING OF FINE CERAMICS"	45
--	----

3.2.7. "AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO TEMPO DE SECAGEM DE ARGAMASSAS DE AGREGADOS LEVES"	47
--	----

3.2.8. "EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA NA SECAGEM DE BETÃO REFRATÁRIO"	49
---	----

3.2.9. "USO DE ESTUFA SOLAR PARA A SECAGEM DE MADEIRA SERRADA"	52
--	----

3.2.10. "ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE SECAGEM DE PLACAS DE GESSO: ESTUDO PARAMÉTRICO".....	57
---	----

3.2.11. "EFEITO DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR SOBRE A TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE PINUS ELIOTTI ENGELM"	61
---	----

3.3. SÍNTESE DOS ARTIGOS ANALISADOS	62
---	----

4. CONCLUSÃO 63

4.1. CONCLUSÕES FINAIS	63
------------------------------	----

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	64
-------------------------------------	----

BIBLIOGRAFIA	65
--------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Esquema representativo das transferências que ocorrem num elemento sob ação de secagem	4
Fig. 2.2 – Porosidade aberta	5
Fig. 2.3 – Porosidade fechada	5
Fig. 2.4 – Representação do teor de humidade num material	6
Fig. 2.5 – Comportamento higroscópico de diferentes materiais	7
Fig. 2.6 – As zonas distintas referentes ao comportamento higroscópico de um material	8
Fig. 2.7 – Evolução da ligação de água aos poros durante o período de adsorção	8
Fig. 2.8 – Fenómeno de capilaridade	12
Fig. 2.9 – Pressão capilar em função do teor de humidade	13
Fig. 2.10 – Sucção capilar em função do teor de humidade	13
Fig. 2.11 – Evolução da frente húmida num material sujeito ao processo de secagem	15
Fig. 2.12 – Curva da percentagem de secagem ao longo do tempo	16
Fig. 2.13 – Curva da percentagem de secagem ao longo do tempo, incluindo a Fase 0	16
Fig. 2.14 – Curvas de secagem analisadas por Van Brackel	17
Fig. 2.15 – Secador Rotativo	26
Fig. 2.16 – Secador Spray	26
Fig. 2.17 – Secador Pneumático	27
Fig. 2.18 – Secador por Vácuo	28
Fig. 2.19 – Secador por Congelação	29
Fig. 2.20 – Secador de estufa estática	32
Fig. 2.21 – Secador túnel contínuo	32
Fig. 3.1 – Curvas de adsorção-desadsorção para o gesso	37
Fig. 3.2 – Taxa de secagem em função da humidade relativa (esquerda) e Taxa de secagem em função da velocidade do ar (direita)	37
Fig. 3.3 – Esquema ilustrativo do <i>cylinder splitting test</i> (Teste Brasileiro)	38
Fig. 3.4 – Evolução da densidade ao longo do material (SCC)	39
Fig. 3.5 – Evolução da densidade ao longo de SC(esquerda) e OC(direita)	39
Fig. 3.6 – Variação do peso ao longo tempo nos 3 materiais	40
Fig. 3.7 – Variação do peso ao longo tempo nos 3 materiais	43
Fig. 3.8 – Curva característica de secagem	44
Fig. 3.9 – Efeito da temperatura do ar na contração	44

Fig. 3.10 – Contração em função da taxa de secagem	44
Fig. 3.11 – Comportamento da contração num material contendo argila	46
Fig. 3.12 – Densidade aparente e contração em função da taxa de secagem	47
Fig. 3.13 – Esquema ilustrativo de um provete e os furos realizados	48
Fig. 3.14 – Curvas de distribuição acumulada segundo o modelo de Andreasen para os betões.....	50
Fig. 3.15 – Distribuições discretas utilizadas na formulação dos betões analisados neste trabalho (q=0.31)	50
Fig. 3.16 – Secador solar utilizado no estudo: vista da parede norte (A) e parede sul (B)	51
Fig. 3.17 – Variações observadas no perfil de permeabilidade e de saída de hidratos em altas temperaturas decorrentes de alterações na distribuição acumulada de partículas das matérias-primas de um betão refratário	52
Fig. 3.18 – Secador solar utilizado no estudo: vista da parede norte (A) e parede sul (B)	53
Fig. 3.19 – Arranjo das placas na secção de teste do túnel de vento	57
Fig. 3.20 – Esquema do túnel de vento e as diferentes secções	58
Fig. 3.21 – Variação da humidade pelo tempo de secagem.....	60
Fig. 3.22 – Efeito da temperatura sobre o tempo de secagem.....	60
Fig. 3.23 – Efeito da distância entre placas sobre o tempo de secagem	60
Fig. 3.24 – Curvas de secagem elaboradas para duas temperaturas de secagem e duas velocidades de ar	61
Fig. 3.25 – Influência da velocidade do ar na taxa de secagem durante a remoção da humidade da madeira À temperatura de 50°C (A) e 110°C (B)	62
Fig. 3.26 – Razão entre as taxas de secagem calculadas para as velocidades de ar de 5,0 e 2,3 m/s em função do teor de humidade da madeira, nas temperaturas de 50 e 110°C	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficientes de difusão	21
Tabela 3.1 – Materiais usados na investigação	36
Tabela 3.2 – Variação do peso ao longo do tempo nos três materiais	42
Tabela 3.3 – Critérios escolhidos para a constituição das argamassas	48
Tabela 3.4 – Teor de humidade, tempo e taxa média de secagem em estufa solar e ao ar livre	55
Tabela 3.5 – Índice de rachaduras de topo (IRT) médio e percentual de peças defeituosas	55
Tabela 3.6 – Arqueamento (A) médio e percentual de peças defeituosas	56
Tabela 3.7 – Encurvamento médio e percentual de peças defeituosas	56
Tabela 3.8 – Percentagem de peças com tensões de secagem em estufa solar e ao ar livre	57
Tabela 3.9 – Cálculos dos tempos de secagem	61

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A_c	– Área de transferência de calor [m ²]
A_R	– Área do corpo que transmite radiação [m ²]
a, b, c, d, e, f, n	– Coeficientes dos modelos [-]
a_w	– Coeficiente de atividade da água [-]
a_{wr}	– Coeficiente de referência de atividade da água [-]
b_0, b_1, b_2	– Constantes empíricas ajustáveis [-]
C'_a	– Concentração de vapor de água na ambiência [kg/m ³]
C'_s	– Concentração de vapor de água à superfície [kg/m ³]
c_0, c_1, c_2 e c_3	– Constantes empíricas ajustáveis [-]
D	– Coeficiente de difusão [m ² /s]
D_{eff}	– Coeficiente de difusividade efetivo [m ² /s]
dp/ds	– Gradiente de pressão de vapor de água [Pa/m]
dw/dt	– Taxa de secagem [-]
E_a	– Energia de ativação [kJ/mol]
g	– Aceleração da gravidade [m ² /s]
g_v	– Fluxo de vapor [Kg/m ² .s]
h_c	– Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m ² .°C)]
k, k_0, k_1	– Constantes de secagem [s ⁻¹]
L	– Espessura do produto [m]
n	– Número de termos da equação [-]
P	– Pressão de vapor [Pa]
P_v	– Pressão na água [Pa]
P_{ar}	– Pressão de vapor de água no ar [Pa]
P_c	– Pressão capilar [N/m ²]
q	– Calor transferido [W]
R	– Raio do cilindro ou esfera [m]
R_1, R_2	– Raios de curvatura [m]
r	– Raio médios dos poros [m]
R^2	– Coeficiente de regressão [-]
R_g	– Constante universal dos gases ideais [kJ/mol.K]
RW	– Razão da humidade [-]
s	– Espessura [m]

T – Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

T_{abs} – Temperatura absoluta [K]

t – Tempo de secagem [h]

t_c – Constante do tempo de secagem [h]

T_r – Temperatura de referência [$^{\circ}\text{C}$]

u – Velocidade do ar [m/s]

u_r – Velocidade de referência do ar [m/s]

w – Teor de humidade [kg/kg]

W_{max} – Teor de humidade máximo [kg/kg]

W_h – Teor de humidade higroscópico [kg/kg]

W_{cr} – Teor de humidade crítico [kg/kg]

W_{sat} – Teor de humidade de saturação [kg/kg]

W_0 – Teor de água inicial [%]

β – Coeficiente de transferência superficial de humidade [m/s^2]

ψ – Sucção capilar [mH_2O]

π – Coeficiente permeabilidade ao vapor de água [$\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$]

ΔT – Variação da temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

ρ – Massa volúmica da água [kg/m^3]

θ_h – Ângulo de humificação [$^{\circ}$]

σ_B – Constante de Boltzmann ($5,6703 \times 10^{-8}$) [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$]

σ – Tensão superficial [N/m]

λ – Condutividade térmica do material [$\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A maior parte dos materiais usados na construção, são de carácter poroso, isto é, são materiais que pela sua estrutura apresentam uma grande capacidade em reter água no seu interior. A presença desta água pode corresponder a uma das principais patologias associadas à construção.

O processo de secagem passa por retirar a água do interior de um material poroso, por via de transferência de massa por ação de uma fonte energética que incide no material. A secagem está então presente na construção sendo mesmo um dos processos mais importantes nesta indústria.

A secagem está presente na construção civil em variadas formas. A contribuição para a formação dos materiais que podem ser usados como elementos construtivos, como por exemplo a cura do betão, a formação do gesso através da desidratação da gipsita, o tratamento necessário da madeira através da secagem natural ou artificial, a transformação da argila e outros cerâmicos por via da secagem, elementos construtivos como o tijolo ou telhas, é uma delas. Contudo, o envolvimento da secagem neste setor passa pelas medidas de correção, através da aplicação deste processo para a reabilitação de condensações, infiltrações, humidade ascensional, de um determinado elemento construtivo.

A secagem é provavelmente o processo mais antigo encontrado na maior parte dos setores industriais. Para além da construção, este fenómeno é também fundamental em setores como agricultura, a indústria alimentar e a farmacêutica. Nas últimas décadas verificou-se um aumento do interesse, quer ao nível industrial, quer ao nível académico, na secagem de sólidos. O aumento do interesse académico no processo de secagem surgiu com o aparecimento de diversos livros de estudo, bem como o desenvolvimento de um jornal internacional (Drying technology iniciado em 1982) ligado ao tema. O sucesso contínuo da International Drying Symposium (IDS), permitiu uma atualização e troca de conhecimentos desde a sua criação com benefícios para a indústria. Este encontro dá-se a cada dois anos e é a maior conferência mundial sobre a secagem de materiais.

Este processo está em constante desenvolvimento, sendo natural o aparecimento de artigos ligados ao tema, pois é necessário aumentar a produtividade, obter uma maior qualidade do produto e de controlo, obter novos produtos e processos, assegurar uma operação mais segura e com qualidade ambiental e a conservação de energia.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO

O principal objetivo deste trabalho foi fazer um levantamento bibliográfico dos trabalhos desenvolvidos pela comunidade científica que abordassem a secagem em materiais de construção. Com essa revisão bibliográfica pretendeu-se perceber quais as condicionantes para a cinética de secagem de um determinado material, ou seja, que fatores a influenciam e os que têm mais peso na taxa de secagem. Dada a disponibilidade de métodos e mecanismos associados a vários tipos de secadores procurou-se saber, também, qual a escolha mais acertada para um determinado material, sempre com a necessidade de otimizar a taxa e qualidade de secagem.

1.3. ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho encontra-se dividido em 4 capítulos:

- O primeiro capítulo apresenta o tema e o seu enquadramento, os objetivos, a metodologia e a organização estrutural da dissertação;
- O segundo capítulo aborda todos os fundamentos associados ao processo de secagem, incluindo os mecanismos de transferência, as fases e a cinética de secagem. Apresenta-se ainda os métodos e principais secadores envolvidos na secagem. Para finalizar é descrita a influência da secagem nos principais materiais de construção;
- No terceiro capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica realizada sobre a secagem em materiais de construção incluindo artigos que analisam a influência de alguns fatores na cinética de secagem ou a preponderância que diferentes mecanismos de secagem têm na otimização deste processo;
- O capítulo quatro resume as principais conclusões que se obtiveram deste estudo e apontando quais as principais condicionantes num determinado processo de secagem nos materiais de construção.

2

FUNDAMENTOS DA SECAGEM

2.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS

Neste capítulo descreve-se o desenvolvimento do processo de secagem, que consiste em dois tipos de transferência, uma de energia e outra de massa que expulsa a humidade do interior do material para o seu exterior. A transferência de energia ocorre sob forma de calor, que é introduzido no material molhado, e a transferência de massa que ocorre aquando da extração de água (estado líquido ou gasoso) a fim de se obter um material seco.

Primeiramente, definem-se as principais características de um determinado material que influenciam os processos de transferência envolvidos durante a secagem. As principais características passam pela porosidade do material, pela sua higroscopicidade e capacidade que este tem em reter e transportar humidade. São caracterizados os diferentes domínios existentes num material em função da percentagem de humidade existente no seu interior.

Segue-se a descrição da convecção, condução e radiação, que são os diferentes tipos de transporte de calor que podem incidir num material molhado, e da transferência de massa que inclui a difusão líquida e de vapor e o transporte de humidade interno criado pelo fluxo capilar.

A análise ao processo de secagem em si é feita através da descrição das fases de secagem, explicando a evolução da humidade existente no material ao longo do tempo. A cinética de secagem é descrita depois das fases de secagem e sustenta matematicamente estas fases. São apresentados vários modelos que foram propostos ao longo do tempo e que são recorrentemente usados para simular a previsão da taxa de secagem nos mais diversos materiais. O passo seguinte passou por apresentar todo o tipo de secadores existentes no mercado, classificando-os quanto ao tipo de transferência de calor que eles podem emitir.

Por fim faz-se uma introdução ao capítulo seguinte e descreve-se o tipo de secagem mais usada nos materiais de construção, referindo quais os materiais que mais requerem este tipo de processo.

2.2. MECANISMO DE SECAGEM

2.2.1. DEFINIÇÃO DE SECAGEM

Entende-se como secagem a remoção de líquido de um sólido, semissólido ou líquido com o fim de produzir um produto sólido através da entrada de energia (maioritariamente sob forma de calor) no produto [1]. Da ação energética sob o produto resulta a saída de humidade do interior para o exterior. São, portanto, estas duas transferências (Fig. 2.1) que importam analisar.



Figura 2.1 – Esquema representativo das transferências que ocorrem num elemento sob ação de secagem.

A entrada de energia (sob forma de calor) pode ser feita por:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação;
- Combinação das anteriores.

A saída de humidade ocorre por:

- Difusão de vapor;
- Fluxo capilar;
- Difusão líquida
- Difusão de Knudsen;
- Fluxo Poiseuille;
- Combinação das anteriores.

A secagem é um processo térmico de elevada complexidade [2], existindo alguns fatores que explicam essa complexidade:

- Entrada de energia intermitente ou contínua;
- Transferência de massa;
- Mudança de fase;
- Transporte de humidade de várias componentes;
- Reações químicas e bioquímicas;
- Mudança da estrutura física do produto;
- Retração do produto;
- Mudança da qualidade do produto.

Na generalidade, a secagem de um material é natural até este encontrar o seu equilíbrio higroscópico (ver 2.2.2.1), ou seja, quando a humidade presente no material está em consonância com a humidade da zona que o envolve. Se o objetivo for reduzir ainda mais a água presente no material é necessário recorrer à secagem artificial (centrifugação, vácuo, estufa, etc.).

2.2.2. CONCEITOS TEÓRICOS

2.2.2.1 Características gerais

Os dois processos de transferência ocorrem simultaneamente quando um sólido com água é sujeito ao processo de secagem: a transferência de energia (maioritariamente sob a forma de calor) realiza-se do ambiente exterior para a superfície, com evaporação da humidade e a transferência de massa, sob a forma de humidade, ocorre do interior do sólido para a sua superfície como consequência da evaporação do processo descrito anteriormente [1, 3].

Para a compreensão do processo destas transferências é necessário o conhecimento das características dos materiais a serem secados. Estas características definem a capacidade que o material tem em fixar a humidade, e o conhecimento dessa capacidade de fixação é essencial para se realizar a secagem.

- Porosidade e porometria

A porosidade de um material pode ser definida como sendo a razão entre o volume total de vazios (por meio da existência de poros e canais) e o seu volume total aparente [4]. Os materiais podem ser então classificados segundo a sua microestrutura como porosos (tijolo, betão, madeira) ou não-porosos (vidro).

Dentro dos materiais porosos existem os que apresentam porosidade aberta, onde os vazios existentes comunicam entre si, e os de porosidade fechada em que os poros existentes não comunicam entre si, não permitindo a transferência de água no seu interior (material impermeável). Com isto, é importante referir que são os materiais de porosidade aberta responsáveis pelo movimento da água no interior dos materiais, tendo portanto um papel determinante na transferência de humidade, como se verá posteriormente.

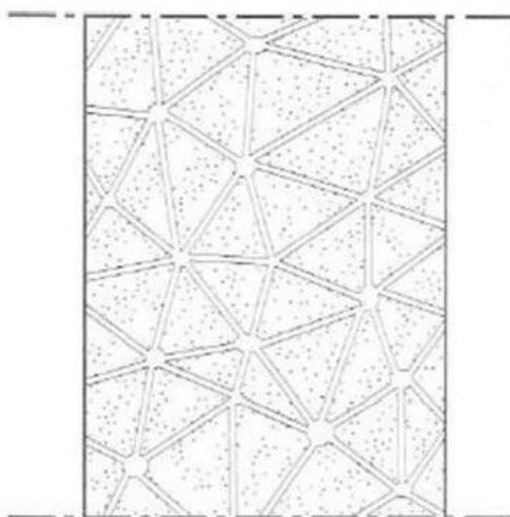


Figura 2.2 – Porosidade aberta [4].

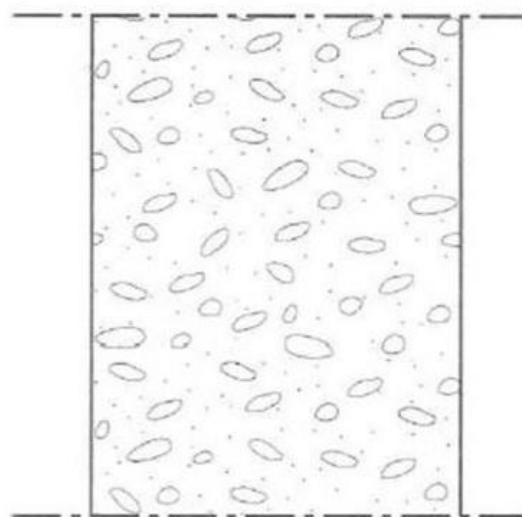


Figura 2.3 – Porosidade fechada [4].

Os poros podem ainda ser classificados quanto à sua dimensão, sendo o diâmetro de cada um o critério aplicado para a distinção entre poros. Os poros podem então ser divididos em três tipos: microporos, mesoporos e macroporos. No caso dos microporos verificam-se forças capilares muito elevadas impedindo a movimentação da água. Os mesoporos, também conhecidos por poros capilares, são os poros responsáveis pela percolação da água líquida através da rede que estes formam. Os macroporos são responsáveis pela condução de vapor de água. De acordo com os valores-limite indicados segundo a norma DIN 66131 [5] os microporos têm diâmetro inferior a 200 \AA , os mesoporos entre 200 e 500 \AA e os macroporos superior a 500 \AA .

- Teor de humidade

Um material diz-se húmido quando contém água nos diferentes estados, em simultâneo ou não. O teor de humidade pode ser higroscópico, crítico, saturado ou máximo.

O teor de humidade higroscópico (W_h) corresponde à quantidade de água que um material contém quando em equilíbrio com uma ambiência que apresenta uma determinada humidade relativa [4].

O teor de humidade crítico (W_{cr}) é o teor de humidade que um material apresenta quando em contacto com uma zona envolvente saturada e abaixo do qual o transporte de água por capilaridade é praticamente impossível [4].

O teor de humidade de saturação (W_{sat}) corresponde à quantidade de água que um material contém quando em contacto com água durante um certo período de tempo [4].

O teor de humidade máximo (W_{max}) é o teor de humidade que um material apresenta quando está completo de água, com exceção do esqueleto sólido da estrutura [4].



			
0	W_h	W_{cr}	W_{sat} W_{max}
Secagem artificial	Domínio higroscópico	Domínio capilar	Humidificação sob pressão

Figura 2.4 – Representação do teor de humidade num material [4].

Como se pode ver pela Fig. 2.4, o teor de humidade varia entre o valor de zero e o W_{max} . Este valor máximo dificilmente é atingido, pois existem pequenas bolsas de ar na região interior dos poros.

Entre o W_{cr} e W_{sat} estamos perante o domínio capilar onde a transferência de massa sob a forma de humidade ocorre sobretudo na forma líquida.

Entre o W_h e W_{cr} o domínio é higroscópico, onde a humidade é transferida sobretudo sob a forma de vapor. A secagem artificial será sempre necessária quando se pretender baixar o teor de humidade depois deste ter atingido o seu valor de equilíbrio (W_h).

- Higroscopicidade

A higroscopicidade de um determinado material traduz a capacidade que este tem em fixar moléculas de água por adsorção e de as devolver ao ambiente que o envolve, em função das variações da humidade relativa do mesmo [4]. Um material é higroscópico (madeira, têxteis, argila) [1] quando a quantidade de água fixada por adsorção é relativamente importante, enquanto que um material é não higroscópico (areia, partículas de polímeros e alguns cerâmicos) [1] quando a sua massa não se altera qualquer que seja a humidade relativa da ambiência onde se encontrem. Na Fig. 4 está representado o comportamento higroscópico dos diferentes tipos de materiais tendo em conta o seu tipo de higroscopicidade.

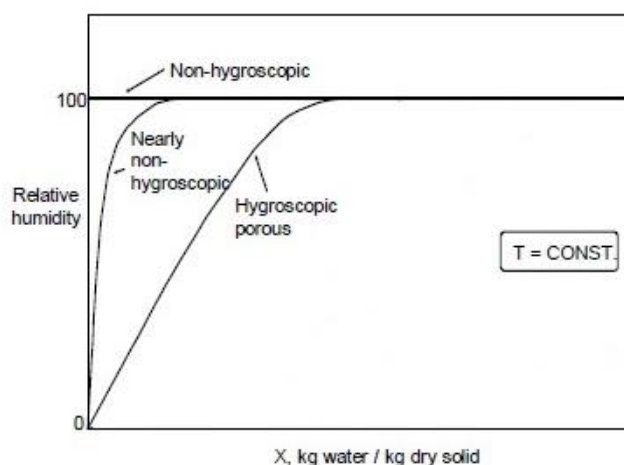


Figura 2.5 – Comportamento higroscópico de diferentes materiais [2].

O comportamento higroscópico de um dado material é explicado através da caracterização de 3 zonas distintas, A, B e C que indicam diferentes mecanismos de ligação de água no interior do material (ver Fig. 2.5 e 2.7). Sendo assim a zona A representa a adsorção monomolecular, ou seja, ocorre a fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interior dos poros, não existindo praticamente diferença entre a adsorção e a desadsorção. Na zona B, verifica-se uma deposição de várias camadas de moléculas nos poros denominando-se de adsorção plurimolecular. Com esta deposição crescente os poros vão diminuindo o seu diâmetro, permitindo a junção de todas as camadas plurimoleculares e originando a condensação capilar [1, 6].

- Condensação Superficial

A condensação pode dar-se na superfície ou no interior dos materiais. Quando numa determinada massa de ar a pressão de vapor e a pressão de saturação se equivalem acontece a condensação do ponto de orvalho, isto é, a quantidade de vapor de água que o ar contém atinge o máximo valor de vapor que o ar pode conter a essa temperatura.

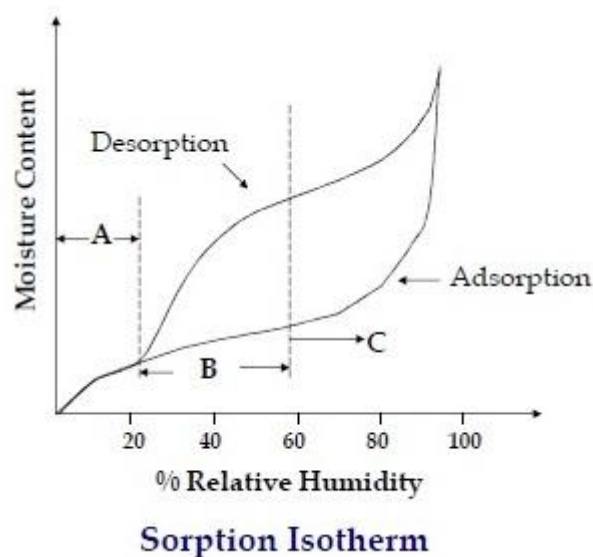


Figura 2.6 – As zonas distintas referentes ao comportamento higroscópico de um material [2].

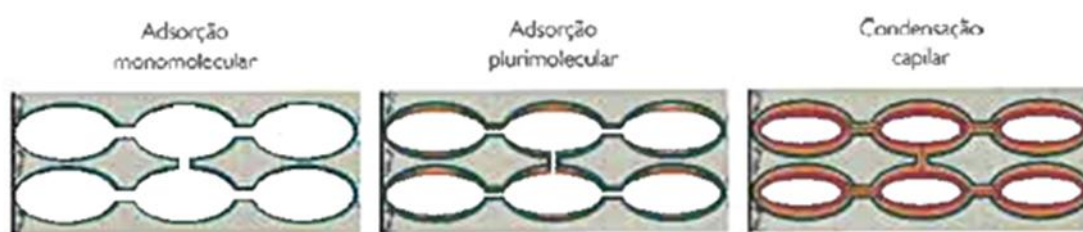


Figura.2.7 – Evolução da ligação de água aos poros durante o período de adsorção[4].

2.2.2.2. Transferência de energia

A energia pode ser transferida por calor, trabalho ou massa [7]. Para que a operação de secagem se desenvolva é necessário que, primeiramente, seja transferido calor para o produto molhado. Uma transferência de energia será sempre uma transferência de calor quando o fator determinante for a diferença de temperatura [7]. O fluxo de calor ocorre sempre a partir de uma região de maior temperatura para uma região de baixa temperatura, e atua no sentido de equalizar as diferenças de temperatura. Como foi apontado em 2.2.1., o calor pode ser transferido por uma ou mais formas distintas.

- **Condução**

A condução térmica é a transferência interna de energia através de difusão microscópica e de colisão de partículas com um corpo. Nessa difusão microscópica e na colisão de partículas estão incluídos moléculas, átomos e elétrons. A condução acontece apenas num objeto ou material ou entre dois objetos que estejam em contato um com o outro [7].

O calor é fornecido de forma indireta, através do contacto do material molhado com uma superfície aquecida. Os meios de secagem usados por condução são chamados de secadores indiretos [1]. Este tipo de secagem é mais indicada para produtos mais finos ou para materiais extremamente saturados. O calor necessário para a evaporação é fornecido através de superfícies aquecidas (fixas ou móveis) colocadas com o secador para suportar e limitar o sólido saturado.

A equação (2.1) que define a condução térmica é dada pela lei de Fourier:

$$q = \lambda \cdot A_c \cdot \frac{\Delta T}{s} \quad (2.1)$$

Em que:

q - Calor transferido [W]

λ - Condutividade térmica do material [W/(m.°C)]

A_c - Área da transferência de calor [m²]

ΔT - Variação de temperatura no material [°C]

s - Espessura do material [m]

- Convecção

Convecção é um processo de transporte de massa caracterizado pelo movimento de um fluido devido à sua diferença de densidade, especialmente por meio de calor [7]. É o meio de transporte de calor mais usado na secagem, e acontece quando o aquecimento, geralmente através de ar ou de produtos de combustão, está em contacto direto com o material molhado (sob a sua superfície) [7].

O calor necessário para a evaporação é fornecido por convecção na superfície exposta do material e a humidade evaporada é executada pelo meio de secagem usado. Estes meios de secagem utilizados na convecção são chamados de secadores diretos.

A equação (2.2) que define a condução térmica é dada pela lei de Newton:

$$q = h_c \cdot A_c \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

Em que :

q - Calor transferido [W]

h_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m².°C)]

A_c - Área da superfície da transferência de calor [m²]

ΔT - Diferença de temperatura entre a superfície e a massa do fluido [°C]

- Radiação

Todos os corpos emitem constantemente energia através de um processo de radiação eletromagnética. A intensidade desta radiação depende da temperatura do corpo e da natureza da superfície. As transferências de calor que ocorrem a altas temperaturas envolvem geralmente uma parte significativa de radiação [7].

A transferência de calor por radiação pode ser descrita como a radiação de “corpo negro”. Um “corpo negro” é definido como um corpo que absorve toda a radiação que cai na superfície.

Trata-se, então, de um corpo hipotético que absorve todo o tipo de comprimento de onda da radiação térmica que lhe incide. Qualquer que seja o “corpo negro” aquecido a uma determinada temperatura emite radiação térmica.

Esta energia pode ser expressa através da lei de Boltzmann:

$$q = \sigma_B \cdot T^4 \cdot A_r \quad (2.3)$$

Em que:

q - Calor transferido [W]

σ_B - Constante de Boltzmann ($5,6703 \times 10^{-8}$) [W/m². K⁴]

T - Temperatura absoluta [K]

A_r - Área do corpo que transmite radiação [m²]

No fenómeno da secagem, os secadores ligados a este tipo de transferência de energia são considerados como secadores indiretos, tais como radiadores a gás ou elétricos (secadores por radiação). As micro-ondas e frequências rádio são também utilizadas na secagem por radiação, em campos apropriados para o efeito. A vantagem da secagem por radiação é a de permitir ajustar o seu fluxo de forma a obter grandes percentagens de secagem.

No entanto, este método de secagem é muito específico sendo utilizado num mercado bastante reduzido. Como se verá adiante, a operação de secagem por radiação requer o uso de instrumentos de convecção ou condução para se remover a humidade a evaporar [1].

2.2.2.3. Transferência de humidade

Como resultado da transferência de calor para o produto molhado, um gradiente de temperatura é desenvolvido enquanto a evaporação da humidade superficial acontece. Assim, se produz uma migração interna de humidade que tem como destino a superfície do material, como foi referenciado em 2.2.2.1., sendo que essa migração pode acontecer por difusão ou por capilaridade

O processo de difusão é importante na maior parte dos materiais, mas tem especial importância naqueles onde o fluxo capilar é dificultado (materiais pouco porosos). A difusão pode ser líquida ou de vapor e pode acontecer de forma separada ou em simultâneo. Este fenómeno ocorre sempre que existe um gradiente no material a secar. O movimento líquido ou de vapor acontece de uma zona de maior concentração para uma zona de menor concentração, com o objetivo de atingir o equilíbrio do material [8].

Na fase líquida, a capilaridade, a gravidade e o efeito dos gradientes de pressão externos comandam o transporte, por sua vez, na fase de vapor, a difusão e os movimentos convectivos no interior dos poros são os fatores condicionantes [1, 8].

Seguem-se os diferentes mecanismos pelos quais a humidade pode ser transportada desde o interior até ao exterior do material.

De referir ainda que, para além da complexidade de cada um dos mecanismos abordados é preciso salientar que o processo de transferência de humidade pode ocorrer com vários mecanismos em simultâneo, e depende de fatores como a precipitação, a humidade relativa, a temperatura, a radiação solar e a pressão do vento na zona envolvente.

- Difusão de vapor

Neste tipo de difusão, as moléculas existentes de vapor de água dirigem-se desorganizadamente em todas as direções, sempre de uma zona de maior concentração para uma zona de menor concentração. A velocidade deste tipo de movimento é proporcional ao gradiente de pressão de vapor referido anteriormente [8].

A difusão de vapor pode dar-se em duas formas distintas. Pode existir difusão através de uma camada de ar ou através de materiais porosos. São dois processos idênticos, só que no caso da difusão de vapor em materiais porosos o transporte depende da estrutura do material [9].

A lei de Fick (2.4) estabelece o fluxo de vapor que atravessa um material poroso, homogêneo com uma determinada espessura, em regime estacionário e em condições isotérmicas.

$$g_v = -\pi \cdot \frac{\partial P}{\partial s} \quad (2.4)$$

Em que :

g_v - Fluxo de vapor [Kg/m².s]

π - Permeabilidade ao vapor [Kg/m.s.Pa]

$\frac{\partial P}{\partial s}$ - Gradiente de pressão de vapor de água

P - Pressão de vapor [Pa]

s - Espessura [m]

Depois de definida a lei de difusão de vapor ao atravessar um material poroso, é importante saber como se processa a evaporação da humidade da superfície do material para o meio ambiente que o envolve (2.5).

$$g_v = \beta \cdot (C's - C'a) \quad (2.5)$$

Em que:

g_v - Fluxo de vapor [Kg/m².s]

β - Coeficiente de transferência superficial de humidade [m/s²]

C's - Concentração de vapor de água à superfície [Kg/m³]

C'a - Concentração de vapor de água na ambiência [Kg/m³]

O coeficiente de transferência superficial de humidade depende de alguns parâmetros que afetam a difusão de vapor, como o teor de humidade do material poroso, a humidade relativa do meio ambiente, a temperatura do material e da zona envolvente, a rugosidade da superfície, a convecção e radiação à superfície e a turbulência e velocidade do ar na superfície do corpo [9].

- Fluxo capilar

O transporte de água líquida na maior parte dos materiais sujeitos ao processo de secagem dá-se sobretudo por capilaridade. Este fenómeno ocorre quando um material poroso entra em contacto com água na fase líquida. Entre a água e o ar contido no interior dos poros formam-se interfaces curvas, devido às forças de atração entre o líquido e o material poroso serem maiores que as forças de coesão do líquido [4].

Pela imagem (Fig. 2.8) é possível perceber o deslocamento da água por capilaridade de uns poros para outros e a ainda a interface curva formada. É também representado o ângulo de humidade que é o ângulo formado entre a superfície do sólido e a tangente à superfície do líquido no ponto de contacto.

Quando o ângulo de contacto de um sólido com a água é superior a 90° estamos perante um material hidrófugo. Para estes materiais, o menisco formado pela água nos capilares é convexo, não havendo progressão de água por capilaridade no sólido poroso. No caso de este ângulo ser inferior a 90°, estamos perante um material hidrófilo, o menisco formado nos capilares é côncavo e há penetração de água por capilaridade no material.

Este movimento do líquido que se gera nos capilares do material resulta de um gradiente de pressões, designado por pressão capilar (2.6), e depende da tensão interfacial dos raios de curvatura e do ângulo de humificação.

$$P_c = P_{ar} - P_{água} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cos \theta_h \quad (2.6)$$

Em que:

P_c - Pressão capilar [Pa]

P_{ar} - Pressão do ar [Pa]

$P_{água}$ - Pressão da água [Pa]

σ - Tensão superficial [N/m]

R_1, R_2 - Raios de curvatura [m]

θ_h - Ângulo de humificação [°]

Da expressão (2.6) importa referir que a pressão capilar é aumentada com o incremento da temperatura e diminui com o aumento do teor de humidade, dado que a tensão superficial varia com a temperatura e o raio da curvatura com o teor de humidade.

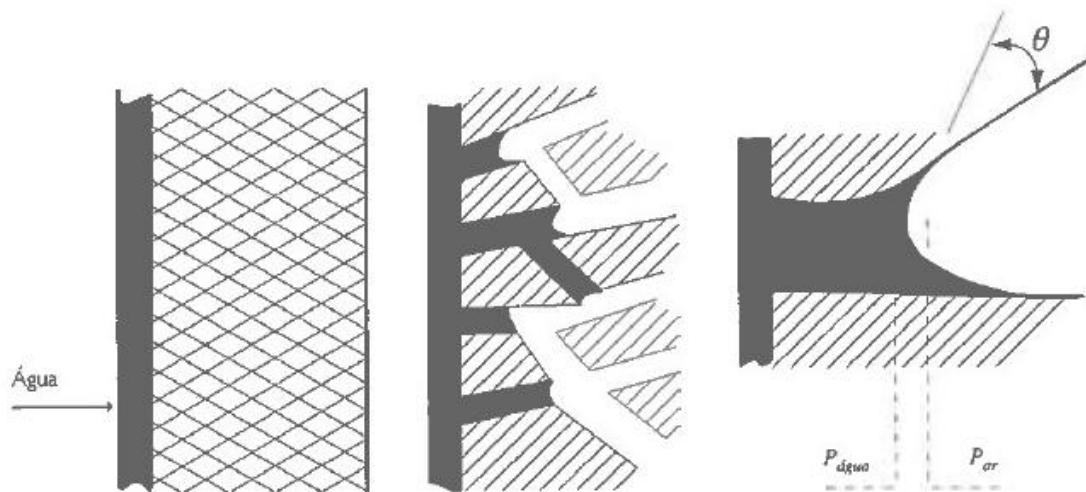


Figura 2.8 – Fenómeno de capilaridade [4].

Na Fig. 2.9 pode-se observar a curva da pressão capilar para diferentes tipos de materiais. Conclui-se que a pressão capilar para todos os materiais diminui com o aumento do teor de humidade do material. Apesar desta diminuição ser generalizada para todos os materiais, a variação depende sempre das características de cada um.

A água contida nos poros desloca-se gradualmente dos poros mais grossos para os mais finos, aumentando a tensão superficial e sugando a água dos poros de maior dimensão que se encontram na vizinhança. Este fenómeno chama-se de sucção capilar e pode ser descrito da seguinte forma (2.7):

$$\Psi = - \frac{P_c}{\rho \cdot g} \quad (2.7)$$

Em que:

Ψ - Sucção capilar [m.c.a]

P_c - Pressão capilar [Pa]

ρ - Massa volúmica da água [Kg/m³]

g - Aceleração da gravidade [m/s²]

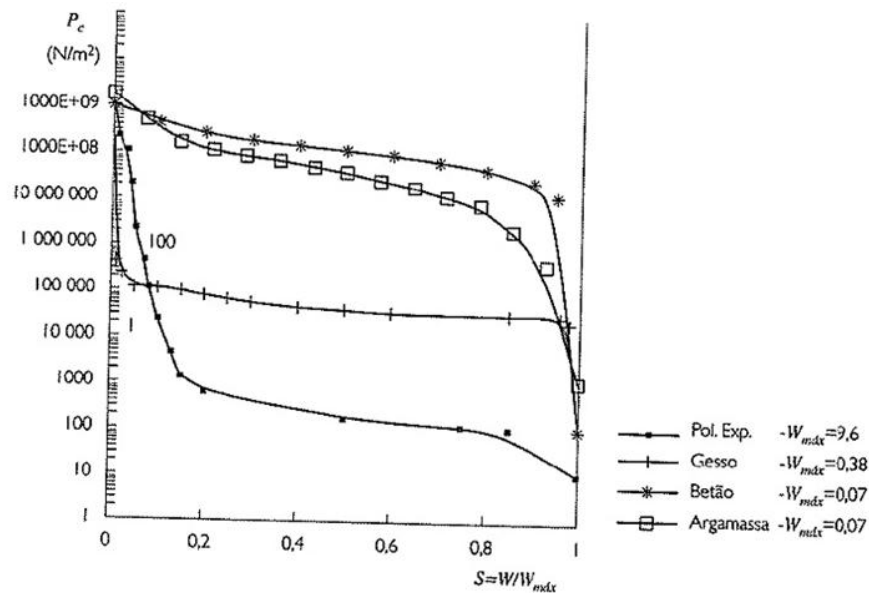


Figura 2.9 – Pressão capilar em função do teor de humidade [4].

A Sucção capilar (Fig. 2.10) depende do teor de humidade (W) no material, sendo máxima quando W se anula, e diminui rapidamente com o crescimento de W até chegar a zero quando o teor de humidade for máximo (W_{max}).

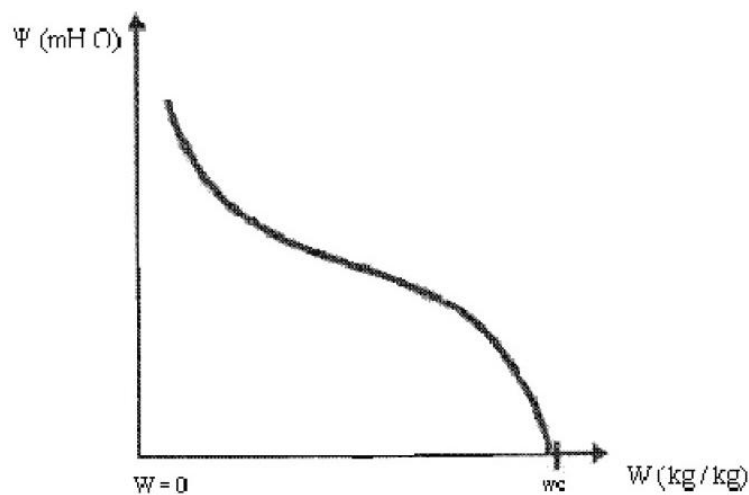


Figura 2.10 – Sucção capilar em função do teor de humidade [10].

- Difusão líquida

O mecanismo de difusão líquida é muito complexo devido à diversidade da estrutura física e da composição química do material. O movimento por difusão líquida acontece devido à existência de um gradiente de humidade entre duas zonas. Esta diferença de humidade desenvolve-se à medida que a frente seca (ver 2.2.3) do material vai avançando e as células mais próximas da

superfície vão absorvendo a humidade das da zona interior, originando um fluxo líquido de dentro para fora.

Na teoria da difusão líquida a segunda lei de Fick (2.8) tem sido a mais utilizada para estabelecer uma razão entre a difusão em função do gradiente de concentração [8]. O coeficiente de difusão é o parâmetro que controla o regime de secagem.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 W \quad (2.8)$$

Em que:

$\frac{\partial W}{\partial t}$ - Taxa de secagem [-]

D - Coeficiente de difusão [m²/s]

W - Teor de humidade no material [Kg/Kg]

2.3. FASES DE SECAGEM

As condições de secagem, estão diretamente dependentes do tipo de contato estabelecido com o material a secar bem como das características do ar de secagem. Para além destas variantes quando se analisa a fase de secagem de um material é preciso ter em conta qual a sua composição, dimensão e estrutura.

Como já foi referido anteriormente, o material, poroso e saturado, é sujeito a contato com ar quente, provocando uma transferência de calor para o produto, devido à diferença de temperatura existente entre o material e a zona envolvente. De forma simultânea ocorre uma transferência de massa para o ar, devido a diferenças de pressão entre o ar e a superfície do produto [8].

A evolução destas duas transferências durante todo o processo de secagem origina 3 fases de secagem distintas [1, 2].

Na fase inicial (Fase 0) o material tem uma temperatura inferior à do ar, sendo a pressão parcial de vapor de água na superfície do material quase nula e consequentemente a transferência de massa e a taxa de secagem são fracas.

O calor do ar de secagem, provoca um aumento da temperatura do material, fazendo com que a pressão aumente e por arrasto a taxa de secagem também sofra um aumento. Este processo continua até que a transferência de calor compense a de massa. Esta fase é muito curta em relação ao período total da secagem.

Terminada a fase inicial, a taxa de secagem permanece constante ao longo de um determinado período de tempo. A este período constante de taxa de secagem corresponde a primeira fase (Fase 1).

Nesta fase a quantidade de água livre dentro do material é considerável, sendo esta evaporada ao longo do tempo para o exterior. Verifica-se um equilíbrio entre a pressão de vapor de água na superfície do material, pressão que é constante, e a pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A velocidade de secagem é por isso constante.

Estando o corpo saturado, existe transporte de água líquida e de vapor de água, o transporte líquido faz-se por capilaridade do interior para a superfície do material, enquanto ocorre a evaporação à superfície.

O transporte de água líquida é superior, nesta fase, ao transporte de água sob a forma de vapor. Com a diminuição do teor de humidade no material, o transporte de água líquida existente para a superfície

tende também a diminuir, mantendo-se contante as condições de difusão entre o produto sob secagem e a ambiência. Enquanto a migração de água do interior do produto para a superfície for suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície esta fase continuará.

A segunda e terceira fase (Fases 2 e 3) correspondem ao período em que a taxa de secagem é decrescente. A água na superfície entra em défice e a velocidade de secagem diminui. Esta fase pode-se subdividir em duas fases.

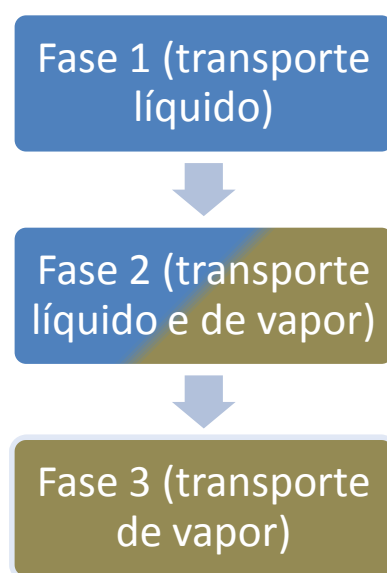


Figura 2.11 – Evolução da frente húmida num material sujeito ao processo de secagem.

A primeira subfase (Fase 2) corresponde ao momento em que se atinge o teor de humidade crítico (W_{cr}), onde a quantidade de água líquida transportada é inferior à quantidade de água sob a forma de vapor que é evaporada. Este ponto depende das condições de secagem impostas, por isso alguns autores defendem que se deve denominar de ponto de inflexão entre a taxa de secagem constante e a taxa de secagem decrescente.

A partir daí, o fluxo de secagem diminui progressivamente passando a evaporação a realizar-se no interior do material. A camada de material seco será cada vez mais espessa, fazendo com que a frente húmida (frente máxima do alcance capilar de um material) do material diminua (ver Fig. 2.11). Nesta fase, coexiste o domínio higroscópico com o domínio capilar.

A segunda subfase (Fase 3) inicia-se quando o teor de humidade é inferior ao teor de humidade crítico, o transporte de água por capilaridade é praticamente impossível, passando o material a apresentar um comportamento higroscópico (W_h).

Nesta fase, o fluxo de secagem tende a diminuir até zero, altura em que o material entra em equilíbrio higroscópico, que corresponde à quantidade de água que um material contém quando em equilíbrio com uma ambiência que apresenta uma determinada humidade relativa.

Estas duas últimas subfases caracterizam-se pelo facto da troca de calor não ser compensada, e portanto a temperatura do produto aumenta até atingir a temperatura do ar. Com a diminuição da evaporação à superfície, o mecanismo de transferência mais evidente nestas ultimas subfases é a migração interna da água.

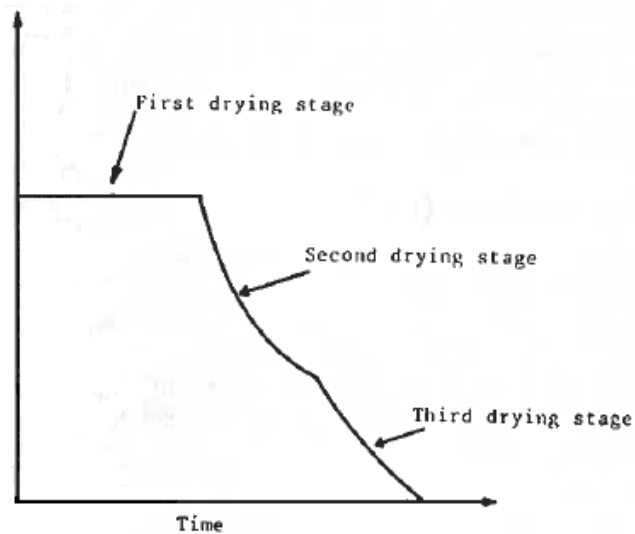


Figura 2.12 – Curva da percentagem de secagem ao longo do tempo [3].

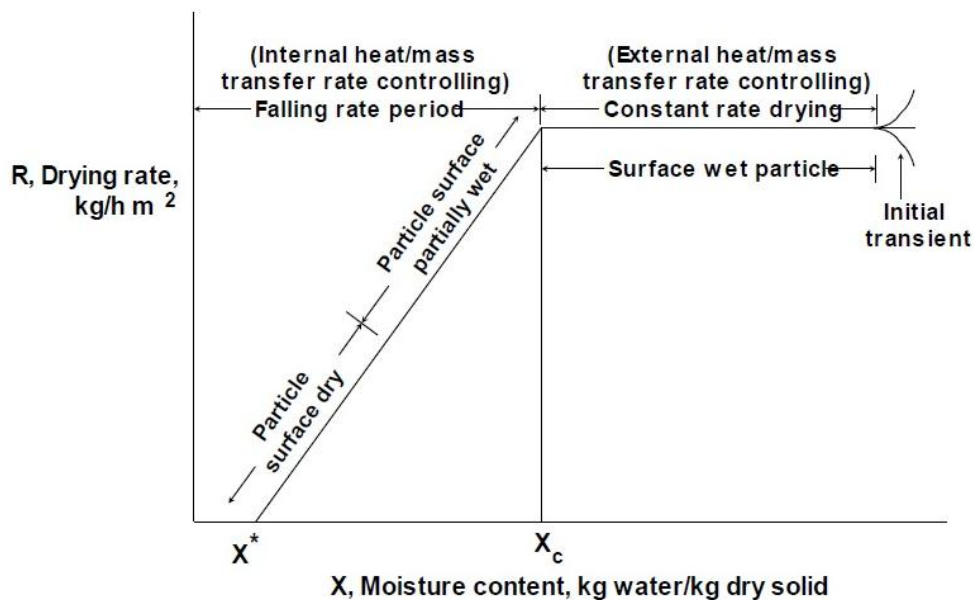


Figura 2.13 – Curva da percentagem de secagem ao longo do tempo, incluindo a Fase 0 [2].

Como foi referido, este processo é generalizado, tratando-se assim de uma curva de secagem característica, nas Fig. 2.12 e 2.13 está representada essa curva característica, que pode ser usada como referência para a generalidade dos materiais. No entanto, cada produto possui as suas próprias características e as condições de secagem fazem por vezes variar as fases de secagem.

Van Brackel [11] agrupou e classificou um grande número de curvas experimentais de taxa de secagem para situações onde as condições de secagem e as características do material fazem com que a verdadeira curva de secagem seja consideravelmente distinta da curva de secagem característica.

Pode-se observar pelas curvas representadas na Fig. 2.14 a diversidade das formas das curvas de secagem em relação à curva característica.

De I a VII e XII, as curvas referem-se a produtos não biológicos, observa-se uma Fase 1 bem definida, sendo que é difícil perceber uma velocidade de secagem constante. De VIII a XI, as curvas representadas referem-se a produtos biológicos, e apenas o período de queda está presente.

A transição do período de secagem constante (na verdade como já foi referido, não chega a ser constante) (Fase 1) para a Fase 2 e 3 é muitas vezes pouco perceptível tornando complicada a determinação do teor de humidade.

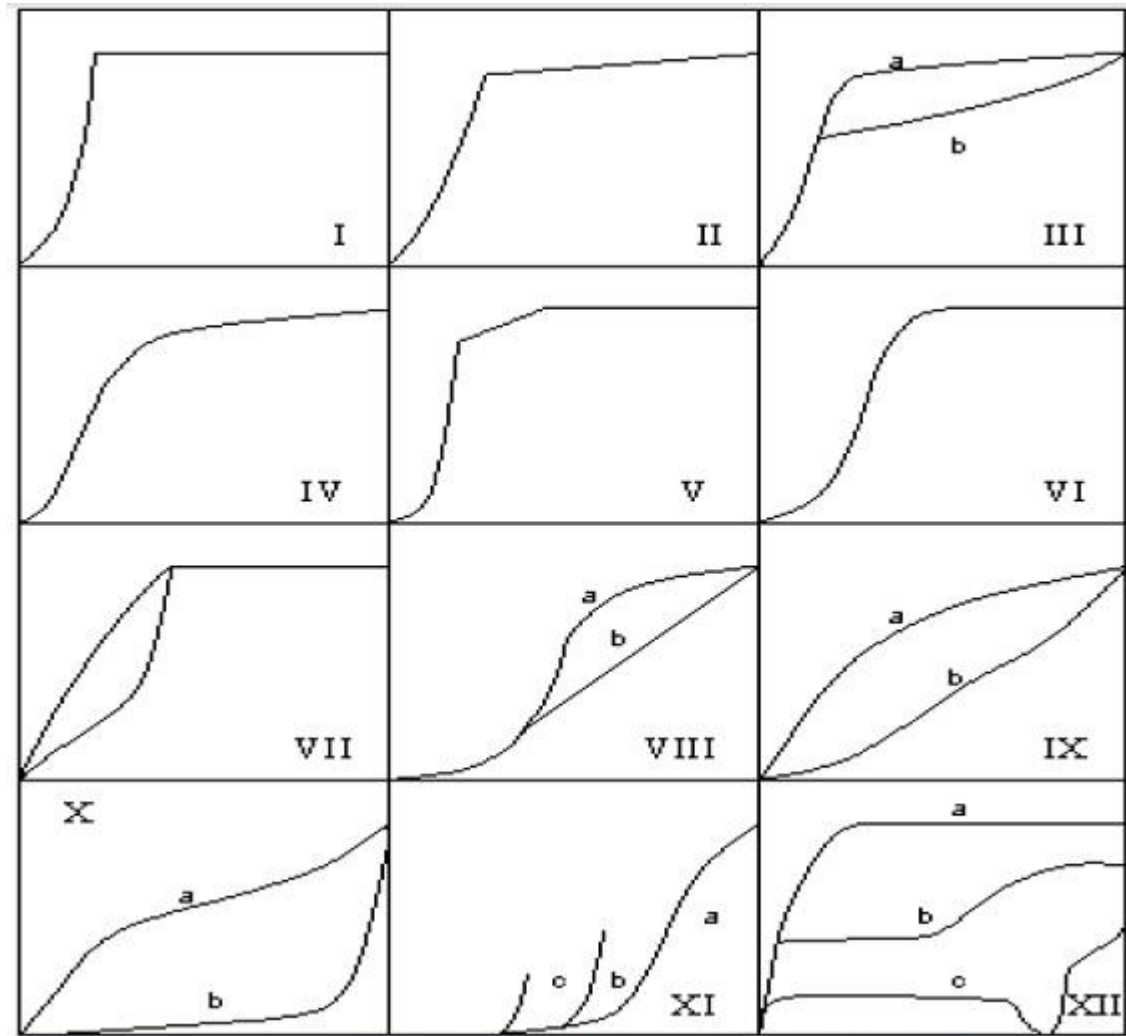


Figura 2.14 – Curvas de secagem analisadas por Van Brackel [11].

2.4. CINÉTICA DE SECAGEM

2.4.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS

A secagem é, hoje em dia, um processo industrial de grande importância, tornando-se por isso indispensável perceber qual será o tempo de secagem de um determinado produto. A dificuldade está na especificidade de cada material por isso a escolha de um determinado processo e equipamento de

secagem deverá ser sempre feito com especial atenção e sempre relacionando com as taxas de secagem.

Como já foi referido para que a secagem ocorra o sistema material-ambiência não pode estar em equilíbrio. É imperativo que o meio que envolve o material tenha uma temperatura superior à do sólido húmido pois só assim se produzirá um fluxo de calor necessário para que a evaporação da humidade tenha início.

O estudo da transferência de calor e massa, além do estabelecimento de possíveis mecanismos de migração interna de humidade possibilita o estabelecimento da taxa de secagem. Com o conhecimento das limitações dos processos para um determinado produto é possível avaliar, projetar e otimizar o processo de secagem permitindo a avaliação do tempo de secagem. A previsão do tempo de secagem é o principal dado para o dimensionamento e a otimização de uma planta industrial de secagem. Sendo assim o estudo da cinética de secagem torna-se indispensável.

Os principais parâmetros da cinética de secagem são a temperatura do ar a humidade relativa e a velocidade do ar.

Na literatura existem várias equações teóricas, semi-teóricas e empíricas que descrevem o fenómeno de secagem. Durante a secagem de produtos higroscópicos porosos, no período de taxa de secagem decrescente, a taxa da transferência de humidade é proporcional à diferença instantânea entre o teor de humidade do produto e o teor de humidade de esperado do material em equilíbrio com o ar de secagem.

$$dW = \frac{-k}{dt} (W - W_h) \quad (2.9)$$

Em que:

W - Teor de humidade [Kg/Kg]

W_h - Teor de humidade higroscópico [Kg/Kg]

k - Constantes de secagem [-]

t - Tempo de secagem [h]

2.4.2. CONSTATANTE DE SECAGEM

A constante de secagem k , é função da constante do tempo de secagem, t_c . Esta constante do tempo, depende da velocidade e da temperatura do ar, que são duas condições da zona envolvente, depende ainda das características do próprio material e da atividade da água.

A expressão que melhor descreve o tempo de secagem é:

$$t_c = c_0 \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^{c_1} \cdot \left(\frac{a_w}{a_{wr}}\right)^{c_2} \cdot \left(\frac{u}{u_r}\right)^{c_3} \quad (2.10)$$

Em que:

t_c - Constante do tempo de secagem [s]

T - Temperatura [°C]

T_r - Temperatura de referência [°C]

a_w - Coeficiente de actividade da água [-]

a_{wr} - Coeficiente de actividade da água de referência [-]

u - Velocidade do ar [m/s]

u_r - Velocidade do ar de referência [m/s]

c_0, c_1, c_2 e c_3 - Constantes empíricas ajustáveis [-]

Na secagem de alguns materiais, que requerem uma atenção higiénica mais apertada (por exemplo alimentos) à disponibilidade de água suficiente para o desenvolvimento de microrganismos, germes ou para a participação em diversos tipos de reações químicas, denomina-se por coeficiente de ativação da água, a_w .

O coeficiente de ativação da água depende da pressão relativa e é definida pela razão entre a pressão parcial da água no material molhado e a pressão de vapor em equilíbrio da água para a mesma temperatura. O coeficiente de ativação da água depende da higroscopicidade do material [2].

$$a_w = \frac{p}{p_v} \quad (2.11)$$

Em que:

a_w - Coeficiente de ativação da água [-]

p - Pressão parcial da água no material molhado [kpa]

p_v - Pressão de vapor em equilíbrio da água [kpa]

O teor de humidade higroscópico (em equilíbrio), W_h , depende da temperatura do ar e da actividade da água. O modelo mais indicado que explica esta dependência, é o modelo de Osmin [13]:

$$W_h = b_0 \cdot \exp\left(\frac{b_1}{T}\right) \cdot \left(\frac{a_w}{1-a_w}\right)^{b_2} \quad (2.12)$$

Em que:

b_0, b_1 e b_2 - Constantes empíricas ajustáveis [-]

Tanto b_0 como c_0 são constantes dependentes da estrutura física dos materiais, principalmente o tamanho médio dos poros. As expressões que relacionam as constantes com o raio médio dos poros são:

$$b_0 = b_0' \cdot r^{b \cdot r} \quad (2.13)$$

$$c_0 = c_0' \cdot r^{-c \cdot r} \quad (2.14)$$

Em que:

b_0', c_0' - Constantes

r - Raio médio dos poros [m]

Integrando a equação 2.9 é possível relacioná-la com a constante do tempo de secagem e obter assim o tempo necessário para alterar o valor de humidade inicial para humidade final (tempo de secagem).

$$t = t_c \cdot \ln \left[\frac{W - W_h}{W_0 - W_h} \right] \quad (2.15)$$

Em que:

t - Tempo de secagem [s]

2.4.3 MODELOS MATEMÁTICOS

Os modelos matemáticos vêm em função da razão de humidade existente no material ao longo do tempo de secagem. Para cada ponto da curva de secagem é possível saber o valor exato do teor de humidade do material.

A razão de humidade é igual integrando a equação 2.9 entre os limites W_0 , início de secagem e W num instante t de secagem fica :

$$RW = \frac{W(t) - W_h}{W_0 - W_h} \quad (2.16)$$

Em que:

RW - Razão de humidade [-]

$W(t)$ - Teor de humidade para um determinado momento [Kg/Kg]

W_h - Teor de humidade higroscópico [Kg/Kg]

W_0 - Teor de humidade inicial [Kg/Kg]

A previsão da constante do tempo de secagem, da constante capilar e da constante de humidade de equilíbrio é baseada assim no raio médio dos poros dos materiais. Este modelo matemático simplificado permite uma antecipação das propriedades higrotérmicas dos materiais de construção com base no raio médio dos poros quando os dados experimentais não estão disponíveis. Além disso, permite prever a quantidade de humidade nas alvenarias, construídas por diversos materiais e em diferentes condições ambientais [2].

Como já foi referido vários métodos para se analisar a secagem de produtos higroscópicos (teóricos, semi-empíricos, empíricos) foram criados. Os métodos teóricos consideram normalmente as condições externas sob as quais ocorre o processo de secagem mas também os mecanismos de transferência interna de energia e massa e os seus efeitos. Como já foi referido em 2.2.2.2. os possíveis mecanismos de transporte de humidade são: difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, difusão de vapor e difusão térmica.

Os modelos teóricos que descrevem a taxa decrescente da secagem de um material, tem como base a lei de Fick onde o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração da água [12, 14]. A lei de Fick descreve então a difusão líquida, existindo condicionantes na sua aplicação no processo de secagem, como: a diminuição do volume ser desprezada, não foi considerado os efeitos da capilaridade, os efeitos de transferência de energia e massa e o equilíbrio térmico com o ar.

A segunda lei de Fick, com as condicionantes referidas em cima, pode ser apresentada por:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 W \quad (2.17)$$

Em que:

$\frac{\partial W}{\partial t}$ - Taxa de secagem [-]

D_{eff} - Coeficiente de difusividade efetiva [m²/s]

W - Teor de humidade no material [Kg/Kg]

A humidade por difusão em sólidos vem em função da temperatura e do teor de humidade. A dependência da temperatura por parte da difusão está convenientemente descrita pela equação de Arrhenius [2].

$$D_{eff} = D \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R_g \cdot T_{abs}}\right) \quad (2.18)$$

Diferentes métodos de medição da humidade por difusão foram descritos por Zogzas, na Tabela 2.1 pode-se ver valores aproximados da humidade por difusão para alguns materiais. É importante referir que a difusão não é uma propriedade de um material e será sempre necessário ter em conta que a aplicação de difusão efetiva em formas de materiais mais complexas poderá levar a erros de cálculo.

Tabela 2.1 – Coeficientes de difusão [2].

Material	Coeficiente de difusão (m^2/s)
Areia	$2,5 \times 10^{-8} - 2,5 \times 10^{-6}$
Arroz	$3,8 \times 10^{-8} - 2,5 \times 10^{-7}$
Banana	$3,0 \times 10^{-13} - 2,1 \times 10^{-10}$
Caulino	$1,5 \times 10^{-8} - 1,5 \times 10^{-7}$
Fibrocimento	$2,0 \times 10^{-9} - 5,0 \times 10^{-9}$
Maçã	$1,0 \times 10^{-11} - 3,3 \times 10^{-8}$
Madeira	$5,0 \times 10^{-10} - 2,5 \times 10^{-9}$
Tijolo	$1,3 \times 10^{-8} - 1,4 \times 10^{-8}$

Para além desta dependência em relação à forma do material a difusão também depende das condições de secagem. Para valores de atividade elevados não se observam grandes diferenças, mas quando os níveis de atividade são mais baixos as difusidades podem distanciar-se devido a consequente alteração da estrutura física do produto seco.

A difusão efetiva é considerada como uma propriedade de aglomerações pois não é possível distinguir nessa difusidade o transporte de água por difusão líquida ou de vapor, por capilaridade ou por fluxo hidrodinâmicos causados pelos gradientes de pressão instalados no material durante a secagem

Muitos investigadores formularam ao longo dos anos de pesquisa expressões analíticas para modelos de difusão líquida e capilaridade do período de queda da secagem (taxa decrescente de secagem) [12]. Estes modelos podem ser utilizados para estimar a difusão do período de queda de secagem ou para estimar a taxa e o tempo de secagem e dependem da forma do material em questão. Os modelos estão preparados para sistemas coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas.

O modelo empírico é um método com fundamentos e de análise adimensional. Na secagem apresenta uma relação direta entre o tempo de secagem e o conteúdo médio de humidade. Não tem em conta os princípios teóricos do processo de secagem e considera parâmetros e coeficientes sem significado físico. Baseia-se nas condições externas, como temperatura, a razão da mistura e velocidade do ar de secagem, não fornecendo indicação sobre o transporte de energia e de água no interior dos produtos.

Entre os modelos mais conhecidos estão o de Thompson e o de Wang & Singh, estando estes modelos mais vocacionados para estudos de secagem ligada à indústria alimentar.

Neste contexto de modelos teóricos e empíricos, aparecem os modelos semi teóricos/semi empíricos que procuram agregar a parte teórica com a experimental. Todos estes modelos têm como base, na generalidade, a lei de Newton para o arrefecimento da transferência de massa.

Para a aplicação destes modelos assume-se que as condições sejam isotérmicas, ou seja, condições onde a temperatura é constante e que a resistência à transferência de humidade esteja condicionada à superfície do material molhado [12].

Os modelos mais usados são o de Page e a sua versão modificada, o de Henderson e Pabis, o de Dois termos e o de Lewis.

Modelos matemáticos (teóricos, semiteóricos e empíricos) usados para descrever a cinética de secagem:

- Modelo de Difusão (Lei de Fick) para uma geometria cartesiana [2, 12]

$$RW = \frac{W(t)-W_h}{W_0-W_h} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 + \pi^2 D_{eff} \frac{t}{4L^2} \right] \quad (2.19)$$

- Modelo de Difusão (Lei de Fick) para uma geometria cilíndrica [2]

$$W = \frac{W(t)-W_h}{W_0-W_h} = 4 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{R^2 \cdot \alpha_n^2} \exp \left[-D_{eff} \cdot \alpha_n^2 \cdot t \right] \quad (2.20)$$

- Modelo de Difusão (Lei de Fick) para uma geometria esférica [2]

$$W = \frac{W(t)-W_h}{W_0-W_h} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-n^2 \cdot \pi^2 D_{eff} \frac{t}{L^2} \right] \quad (2.21)$$

- Modelo de Thompson [15]:

$$t = a \cdot \ln(RW) + b \cdot [\ln(RW)]^2 \quad (2.22)$$

- Modelo de Wang e Singh [15, 16, 17, 18]

$$RW = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2 \quad (2.23)$$

- Modelo de Newton / Lewis (1921) [15, 16, 17, 18, 19]

$$RW = \exp(-k \cdot t) \quad (2.24)$$

- Modelo de Page [15, 16, 17, 18, 19]

$$RW = \exp(-k \cdot t^n) \quad (2.25)$$

- Modelo de Page (Modificado) [15, 18, 19]

$$RW = \exp[-(-k \cdot t)^n] \quad (2.26)$$

- Modelo de Logarítmico [15, 16, 17, 18, 20]

$$RW = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c \quad (2.27)$$

- Modelo de Midilli [15, 17, 20]

$$RW = \exp(-k \cdot t^c) + b \cdot t \quad (2.28)$$

- Modelo de Verma ou Aproximação de difusão [15, 17]

$$RW = -a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \quad (2.29)$$

- Modelo de Resíduos sucessivos [21]

$$RW = a \cdot \exp(-(b \cdot \exp(-c \cdot T^{-1}))t) + d \cdot \exp(-(e \cdot \exp(-f \cdot T^{-1}))t) \quad (2.30)$$

- Modelo de Henderson e Pabis [15, 16, 17, 18, 19, 20]

$$RW = a \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (2.31)$$

- Modelo de Henderson e Pabis (Modificado) [15, 16]

$$RW = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \quad (2.32)$$

- Modelo de Dois termos [15, 17, 19, 20]

$$RW = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \quad (2.33)$$

- Modelo de Exponencial de dois termos [15]

$$RW = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t) \quad (2.34)$$

Em que:

RW - Razão de humidade [-]

t - Tempo de secagem [s]

T - Temperatura de secagem [°C]

k, k_0, k_1 - Constantes de secagem [s^{-1}]

a, b, c, d, e, f, n - Coeficientes dos modelos [-]

n - Número de termos da equação

D_{eff} - Coeficiente de difusão efetiva [m^2/s]

L - Espessura do produto [m]

R - Raio do cilindro ou esfera [m]

Para cada estudo será sempre necessário fazer-se um ajuste do ou dos modelos matemáticos aos dados experimentais de cada situação. Na literatura existem vários tipos de parâmetros que podem ser usados como ajuste de um modelo que se pretenda utilizar. Esse ajuste permite ao utilizador perceber qual o melhor modelo a ser usado para estudar a cinética de secagem de um determinado material.

O melhor ajuste entre os valores do modelo e os experimentais pode ser determinado pelos seguintes parâmetros: o maior valor do coeficiente de regressão (R^2), a menor soma dos erros quadrados entre o experimental e o teórico (SEE) e o menor valor do Root Mean Square Error – raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), usando as seguintes equações [22].

$$R^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{RW_{teo,i(t)} - \overline{RW_{exp}}}{RW_{exp,i(t)} - \overline{RW_{exp}}} \right] \quad (2.35)$$

$$SEE = \sum_{i=1}^n (RW_{exp,i(t)} - RW_{teo,i(t)})^2 \quad (2.36)$$

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (RW_{teo,i(t)} - RW_{exp,i(t)})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.37)$$

Em que:

$RW_{teo,i(t)}$ - Razão da humidade teórica prevista [-]

$RW_{exp,i(t)}$ - Razão da humidade experimental [-]

n - Número de constantes [-]

N - Número de observações [-]

É possível ainda selecionar o modelo que melhor se ajusta aos resultados práticos através da conjugação do erro quadrático médio ($RMSE$), do *chi-square* (χ^2), e do erro percentual relativo (PE) que trabalha com as diferenças absolutas entre o teórico e o experimental. Existe ainda o erro médio de viés, que compara as diferenças entre o teórico e o experimental [23].

$$\chi^2 = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^N (RW_{exp,i(t)} - RW_{teo,i(t)})^2 \quad (2.38)$$

$$PE = \frac{100}{n} \times \sum \frac{|RW_{exp,i(t)} - RW_{teo,i(t)}|}{RW_{exp,i(t)}} \quad (2.39)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RW_{exp,i(t)} - RW_{teo,i(t)}) \quad (2.40)$$

No caso do SEE, RMSE e χ^2 quanto mais próximo de zero melhor é a previsão teórica dos resultados experimentais. Sempre que os erros percentuais forem inferiores a 10% então o modelo teórico indica um bom ajuste.

2.5. MÉTODOS E EQUIPAMENTOS DE SECAGEM

A seleção do método de secagem e do tipo de secador a usar sempre foi caracterizada como uma arte em vez de uma ciência, sendo essa seleção baseada em experiências anteriores ou recomendações dos vendedores.

Esta tarefa de seleção é cada vez mais difícil pois o número de equipamentos disponíveis no mercado tem aumentado significativamente, e a secagem hoje em dia tem de obedecer a certas condicionantes como restrições ambientais, altas percentagens de produção, especificações restritas de qualidade e otimização de custos [2].

A maior parte das empresas, especializada em secagem, cometem ou cometeram erros na escolha do método e do equipamento, até porque a melhor escolha para um determinado momento não garante que seja a ideal para outro momento específico.

Importa agora referir quais os métodos e equipamentos de secagem usados. Como já foi referido em 2.2.2.1. a convecção, a condução e a radiação são as formas de calor que podem ser utilizadas com o objetivo de se proceder à secagem de um determinado material.

Os secadores geralmente dividem-se pelo tipo *batch* (descontínuos) ou contínuos [1]. Em cada um destes tipos os secadores dividem-se pelo tipo de calor que é fornecido: convecção, condução ou radiação.

2.5.1. SECADORES POR CONVECÇÃO

2.5.1.1. “Batch” – Descontínuos

- *Batch tray* (bandejas) *dryers*

Os secadores mais simples e usados na indústria da secagem são os fornos ou cabines onde o material a ser secado é introduzido.

Dentro do forno o material fica sujeito a secagem sob condições naturais ou por convecção forçada através do uso de ventiladores, até que a secagem esteja completa.

O meio de calor e secagem normalmente usado é o ar aquecido através de um permutador de vapor aquecido. O ar passa transversalmente às bandejas onde o material é colocado, ou em alguns dos casos através da própria bandeja, tendo esta que ser perfurada ou através de uma teia metálica.

O secador de bandejas, consiste num forno ou cabine com um tamanho suficiente para receber o material a secar, no qual se faz correr um ar seco e quente em quantidades necessárias para o processo de secagem. Geralmente o ar é aquecido a vapor que não está saturado de maneira a que posso retirar a água do material saturado e assim realizar uma secagem eficiente [1, 2, 3].

2.5.1.2. Contínuos

- *Truck-and-tray tunnels*

Frequentemente de grandes dimensões no qual um determinado número de “*Laden Trucks*” (contentores) são carregados no interior e sujeitos a condições de convecção forçada semelhantes às dos secadores “*batch tray*”.

Este tipo de túneis são frequentemente concebidos para trabalhar automaticamente de maneira continua ou semicontinua, sendo que a carga está sujeita a condições de temperatura e de tempo (ciclos de tempo) apropriadas às características dos materiais em questão.

- Secador rotativo de bandejas

Composto por várias camadas de bandejas rotativas, sendo que o material a secar é colocado na camada superior e vai descendo até terminar o processo de secagem. Na parte central o secador rotativo de bandejas possui uma espécie de pás que formam ventoinhas e que fazem circular o ar por cima das camadas através de bobinas de aquecimento situadas na periferia das bandejas.

- *Continuous through dryers or band dryers*

Secadores compostos por uma ou mais bandejas de metal perfuradas onde o material molhado é carregado e distribuído sendo filtrado ao longo do secador, enquanto o ar aquecido atravessa o material.

O produto seco é descarregado continuamente até à saída do secador. A temperatura e a humidade do meio de secagem usado (ar) podem ser ajustadas durante a passagem do material para satisfazer as características de secagem.

- *Rotary dryers*

Um secador rotativo permite obter humidades finais, no produto a secar, muito baixas. Dentro da secagem contínua é uma das formas mais utilizadas pois é adequado para uma grande diversidade de materiais oferecendo ao utilizador uma secagem relativamente rápida e de baixo custo, principalmente para grandes quantidades de material a secar.

Este tipo de secador (ver Fig. 2.15) é constituído por um cilindro oco rotativo horizontal. Dentro deste cilindro o material molhado é colocado entrando por um lado e saindo pelo oposto. As dimensões do cilindro variam consoante as necessidades operacionais e de vazão processadas.

O ar é aquecido através de um gerador de ar quente do tipo direto no qual o ar de secagem e os gases de combustão são misturados. O ar quente entra em contato com o produto mais húmido para evitar que o mesmo queime, já que a água que contém absorve rapidamente a energia deste ar, esfriando-o de forma quase instantânea.

No interior dos secadores existem pás que tem como função remover o produto, facilitando assim a circulação do material dentro do secador e aumentando o coeficiente de transferência térmica do

equipamento. Ao girar o corpo do secador, as pás levantam o produto e o fazem cair em forma de chuva, favorecendo o contato ar-partícula.



Figura 2.15 - Secador rotativo [24].

- *Fluid bed dryers*

Este tipo de secadores são usados mais especificamente para retirar a humidade da superfície e a que se encontra na estrutura de pós, e materiais granulares ou cristalinos. A secagem é suave e demora algum tempo.

O ar quente passa através de um tabuleiro distribuidor e perfurado, a uma determinada velocidade, de maneira a que origine um fluxo líquido do material. O contato suave do gás usado na secagem e o produto assegura uma minimização de atrito e criação de lixo.

- Secadores *spray*

Este tipo de secador é ideal para soluções de secagem de líquidos. A secagem por *spray* é a tecnologia industrial mais usada para a obtenção de sólidos em pó a partir de uma solução líquida. A solução ou suspensão é atomizada num *spray* de gotículas, as quais entram em contato com um fluxo de ar quente dentro da câmara de secagem. A área superficial do líquido é aumentada até este se tornar instável provocando a sua desintegração.

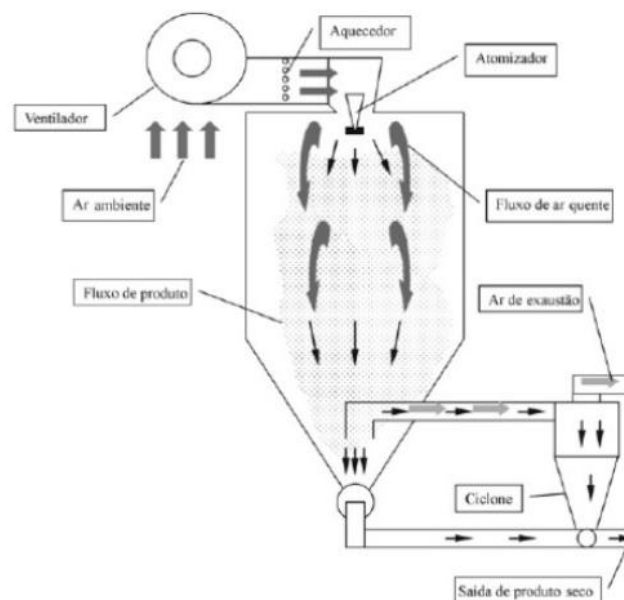


Figura 2.16 - Secador *spray* [25].

O secador *spray* possibilita a secagem de produtos sensíveis ao calor, por contar com tempos de secagem muito curtos e temperaturas de produto relativamente baixas.

O tecnologia por secagem spray possibilita oferecer diferentes soluções de secagem consoante o tipo de produto, as propriedades da alimentação líquida e as propriedades que são desejadas do produto seco.

- Secadores pneumáticos ou *flash*

Um secador pneumático ou *flash* é um equipamento que possibilita secar um material sólido e húmido através de um fluxo de ar, aquecido, que circula a alta velocidade situado numa coluna vertical. O ar é aquecido geralmente através de um gerador de ar quente, onde os gases de combustão são misturados com uma corrente de ar exterior, resultando numa mistura com a temperatura pretendida para que o processo de secagem se inicie.

Devido à estrutura geométrica da coluna e à inercia das partículas, a velocidade do fluxo de ar neste tipo de secadores é pulsante e consegue sofrer variações relativas entre o ar e a partícula resultando assim em altos coeficientes convectivos. Os materiais a serem processados num secador devem ser desaglomeráveis para maior contato entre o ar e a partícula para que a secagem ocorra mais rapidamente.

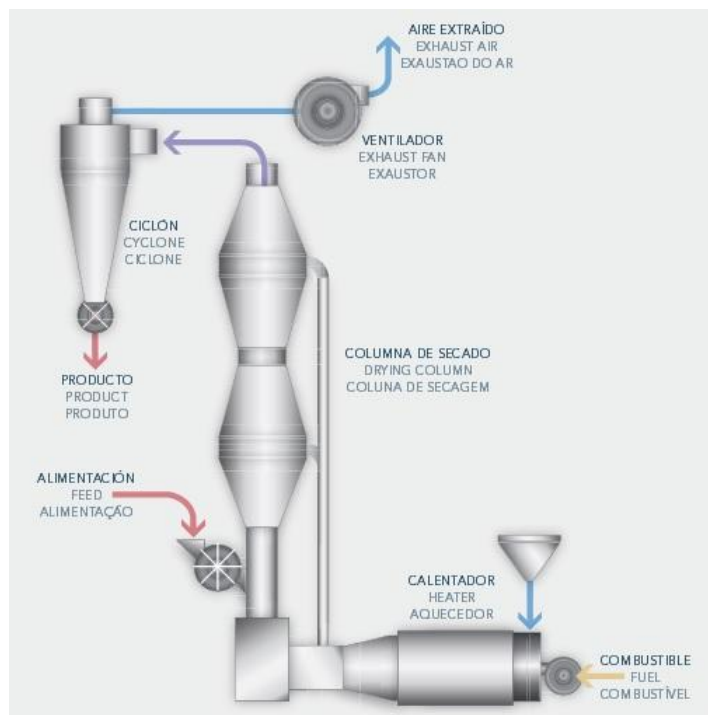


Figura 2.17 - Secador pneumático [26].

A corrente gasosa e os sólidos são introduzidos num sistema de separação ciclónica, obtendo-se um produto seco na descarga e ar de exaustão para a atmosfera isento de pó.

Em muitos casos onde o sólido que se pretende secar está extremamente saturado é necessário adicionar ao secador pneumático um sistema de recirculação de produto seco que se mistura com a alimentação, isto faz com que a humidade do material reduza mais facilmente mantendo o produto homogeneizado.

O produto entra no equipamento mediante um alimentador montado na base da coluna de secagem que gira a alta velocidade, impulsionando o produto no sentido vertical e ascendente, facilitando o

seu arrasto pelo fluxo de secagem e evitando a sua acumulação nas partes horizontais do secador flash.

As vantagens de um secador deste tipo são: permite uma secagem rápida, quase instantânea, e o fluxo concorrente possibilita uma secagem homogênea; o material não necessita de equipamento adicional de transporte pois o próprio secador transporta o produto; para além de uma mão-de-obra mínima existem baixos custos operacionais devido ao seu alto rendimento térmico.

2.5.2. SECADORES POR CONDUÇÃO

2.5.2.1. “Batch” – Descontínuos

- *Vacuum tray dryers*

Consiste num sistema isolado ou num aquecimento fechado onde são introduzidas bandejas com o material, sendo apoiados por plataformas de metal aquecidos a vapor ou pratos aquecidos eletricamente. O isolamento é garantido através de uma porta que garante o vácuo juntamente com um condensador e um “vacum pump” que é um objeto criado para remover moléculas de um gás de um ambiente selado.



Figura 2.18 – Secador por vácuo [27].

Os secadores de congelação são um tipo destes secadores por vácuo. A secagem por congelação é um método de secagem onde o produto é congelado antes de se sujeitar à secagem sendo depois sublimado, ou seja, passa a gás diretamente da fase sólida, abaixo do ponto de fusão do material. É um método cada vez mais usado na secagem de alimentos e já é muito experimentado sem secagem de produtos médicos ou mesmo na indústria farmacêutica. Este interesse crescente baseia-se na capacidade que este método tem em manter as propriedades biológicas do material. A pressão do *freeze dryer* é normalmente reduzida por um sistema a vácuo, onde o vapor produzido pela sublimação é removido do sistema, através da sua transformação em gelo recorrendo a um condensador, que trabalha fora do secador e opera a baixas temperaturas.



Figura 2.19 – Secador por congelação [28].

- *Vacuum double cone dryers*

Sofrem uma rotação sobre os seus eixos e a carga molhada é introduzida entre estes. Geralmente são providos de meios mecânicos que permite travar a carga durante a secagem [1, 2, 3].

- *Pan dryers*

Consiste num tubo de grandes dimensões equipado com meios para agitar a carga. Podem ser usados em condições de pressão reduzida e podem ser aquecidos por um engenho a vapor, eletricamente ou por fogo direto [1, 2, 3].

São normalmente preparados para trabalhar a plena carga (material distribuído ao longo do tubo) e podem ter porta de descarga em cima ou pela zona lateral do tubo.

2.5.2.2. Contínuos

- *Film drum or roller dryers*

Desenhados para secar perante condições atmosféricas ou por vácuo e consiste em um ou dois cilindros aquecidos a vapor que rodam sobre os seus eixos [1, 2, 3].

Uma camada fina de líquido contendo um sólido em solução ou suspenso é formada a superfície do tambor em que seca durante a rotação deste, sendo o material seco removido por pás ou facas de médico.

- *Cylinder or can dryers*

Modo de operação muito semelhante ao *Film drum*, no entanto os secadores consistem tambores aquecidos a vapor espalhados pela superfície, a secagem resulta do contacto direto entre o material e a superfície do tambor aquecida a vapor.

- *Rotary dryers*

Os *rotary dryers*, secadores rotativos podem funcionar de forma direta ou indireta, ou seja por convecção ou condução. Neste caso o secador é indireto [1, 2, 3].

É normalmente aquecido através da combustão de gases que passam na parte externa da superfície, que sofre rotação e pela qual o material passa continuamente tal como nos secadores rotativos diretos.

Lifting flights são previstos mas neste caso bem mais rasos que no caso dos secadores rotativos por convecção porque o uso deste secador está limitado a materiais finos ou produtores de lixo.

2.5.3. SECADORES POR RADIAÇÃO

- Secadores por micro-ondas

Pode ser usado para secagem de ar ou por vácuo. Hoje em dia é dos tipos de secagem com mais interesse e pesquisa na indústria.

As micro-ondas penetram facilmente em todas as partes do material, secando-o de forma uniforme (aquecimento volumétrico).

Estas ondas produzem calor através da vibração de moléculas de água, quase um bilião de vezes por segundo. A fricção resultante converte a energia radio em energia de calor, evaporando a água.

Permite ao utilizador um aumento da qualidade, um consumo de energia menor, reduzindo a emissão de gás e aumentando a segurança. [1, 2, 3]

2.6. SECAGEM NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

A maior parte dos materiais de construção são higroscópicos e porosos, por isso o seu comportamento insere-se nos fundamentos de secagem descritos até agora.

Tal como muitas outras indústrias ou setores, a construção civil requer a aplicação do processo de secagem nos seus materiais, sendo uma das indústrias que mais beneficia dos avanços desta tecnologia.

Muitos materiais de construção sofrem este processo e para isso o conhecimento deste fenómeno torna-se indispensável. Aqui são expostos alguns materiais de construção (betão, madeira, gesso, tijolo e outros cerâmicos) sujeitos ao processo de secagem, indicando em que contexto surge a secagem, e os principais métodos e equipamentos utilizados.

2.6.1. BETÃO

O betão é composto pela junção de cimento, agregados (grossos e finos) e água, e resulta do endurecimento da pasta de cimento. Para além destes elementos preponderantes, o betão pode conter adjuvantes e aditivos [29].

A cura do betão é uma secagem de forma controlada, pois a evaporação à superfície terá sempre que ser minimizada, sendo que os valores minimizados dependem sempre do tipo de betão pretendido. A secagem natural de betão tem então que ser controlada pois o betão não pode simplesmente estar exposto a fatores exteriores como a temperatura, a velocidade do ar e a humidade, pois estes fatores são responsáveis pela redução extrema do teor de água do betão e consequente deterioração deste material.

A secagem deve então ser controlada pois o cimento, parte constituinte do betão, necessita de água suficiente para se hidratar de forma a desenvolver as propriedades desejadas.

Para este controlo de secagem no betão os métodos mais conhecidos são: cura húmida onde o objetivo passa por manter o betão húmido durante o processo de secagem, aplicando água na sua superfície de forma a minimizar a evaporação; cura química, através da aplicação de um produto químico específico

que crie uma película na superfície do betão e que impeça o normal processamento de secagem; cura térmica, processo realizado em estufas ou câmaras que contribui para a otimização do traço (relação quantitativa entre as quantidades, utilizadas na produção do betão, de cimento, água e agregados.) e garante a humidade pretendida, acelerando a velocidade de ganho da resistência do betão. Sendo a cura mais eficiente é neste momento utilizada por muitas empresas que trabalham com betão pré-fabricado, pois a redução do tempo de cura permite colocar as peças de betão no mercado num menor período [30].

2.6.2. MADEIRA

A madeira é um material natural proveniente das árvores usado na construção civil. É mesmo em muitos países o principal material de construção usado (Noruega, Canadá e Nova Zelândia). É por natureza um material poroso que possui uma grande quantidade de água indispensável ao seu desenvolvimento. Sendo assim, o processo de secagem é fundamental no tratamento deste material de construção uma vez que é necessário diminuir drasticamente o seu teor de água (ao contrário do betão).

A secagem de madeira é uma técnica que consiste na redução do seu teor em água, com o objetivo de que a madeira atinja um determinado valor de humidade, com uma maior redução possível de defeitos, dependendo sempre o tipo de utilização que para a qual está destinada. Com a redução pretendida a madeira adquire uma maior resistência mecânica permitindo-lhe alcançar uma melhor capacidade de preservação e aplicação sem variações de tamanho significativas. A secagem pode ser efetuada naturalmente (sendo a madeira exposta ao ar livre), artificialmente (realizada em estufas próprias), ou pela conjugação destas duas formas [31].

O tipo de secagem de madeira vai influenciar o tempo de secagem. A secagem ao ar livre será sempre o método mais natural no entanto é aquele que demora mais tempo. Normalmente, e dependendo do tipo de madeira bem como das condições exteriores, a madeira demora meses a secar ao ar livre até atingir as condições de utilização desejadas.

De um modo geral, uma estufa de secagem de madeira, deve possibilitar uma circulação mais rápida do ar no seu interior, temperaturas maiores que as do ambiente externo e uma variação controlada da humidade relativa no seu interior. Será então uma secagem mais rápida, permitindo ao comerciante uma entrada célere de madeira, pronta a ser utilizada, no mercado. Neste tipo de secagem o comerciante protege a madeira de ataques de fungos e insetos controlando ainda com melhor eficácia os defeitos inerentes à secagem. Outro aspeto importante é poder secar a madeira com igual eficácia durante todo o ano e dispensa grandes áreas necessariamente requeridas para o caso da secagem natural.

A circulação do ar pode se classificar como natural ou forçada. No caso de se tratar de uma circulação natural a secagem baseia-se do princípio de que ar quente sobe e o ar frio desce, sendo importante uma localização correta das aberturas de entrada de ar seco e frio, bem como de ar húmido e quente. A circulação forçada, obtém-se recorrendo a circuladores de ar elétricos, tendo a vantagem de se poder usar velocidades superiores ideais para madeiras com uma humidade inicial muito alta.



Figura 2.20 – Secador de estufa estática [32].



Figura 2.21 – Secador túnel contínuo [33].

A madeira pode então ser secada de forma artificial através de secadores desenhados para o efeito. As estufas estáticas (ver Fig. 2.20) e os tuneis de secagem (ver Fig. 2.21) em movimento contínuo são duas boas soluções de secagem. As estufas têm um baixo consumo de energia e não requerem nenhuma obra de construção civil para o efeito [32]. Por sua vez os tuneis de secagem contínuos para além de terem as vantagens referidas para as estufas, possibilitam uma fácil operação de secagem, reduzindo o tempo e o dinheiro despendido nas operações de carregamento e descarregamento da madeira como nas estufas estáticas, permite ainda uma racionalização do vapor usado pois não necessita de picos de vapor no início do ciclo de secagem [33].

2.6.3. ARGILA

O processo de secagem de uma peça cerâmica não pode se efetuar de qualquer forma. É necessário tomar algumas precauções pois não se pretende que apareçam quebras, ou deformações da peça a ser trabalhada. Uma secagem muito rápida e de forma heterógena pode ser responsável por estes problemas mencionados. Quanto mais homogéneo e uniforme for o processo de secagem melhor para a obtenção de um bom produto final.

Tal como foi explicado nos mecanismos de transporte de massa e na fase de secagem, a secagem de uma peça ocorre de fora para o interior, sendo que a primeira fase corresponde à evaporação de água da superfície. O processo de secagem de uma peça de cerâmica segue exatamente este mecanismo, por isso, uma grande diferença de humidade entre a zona exterior e a zona interior, favorece o crescimento do gradiente húmido provocando, neste tipo de material, o aparecimento de fendas.

Normalmente o método de secagem passa por introduzir a peça confeccionada numa prateleira e deixar que o ar faça o trabalho de secagem. O ar é fundamental nesse processo, bem como as condições da temperatura e humidade do ambiente, que são como já foi referido anteriormente os três fatores que condicionam o desempenho da cinética de secagem.

Em ambientes onde a temperatura é alta o processo de secagem acelera mas requer um maior cuidado para que a peça seque da forma mais uniforme possível. Pelo contrário, em ambientes onde a humidade do ar é elevada a peça pode demorar mais tempo até que fique pronta para a queima.

Durante a secagem, a água que evapora deixa espaços vazios entre as partículas da argila que se acomodam naturalmente. Normalmente, ocorre um ligeiro encolhimento da peça em relação ao tamanho original. Esse fator de redução varia de acordo com a argila utilizada. Em geral, sempre que for possível, deve-se alternar a posição da peça para que todas as partes fiquem em contato com o ar. No caso de placas ou de peças mais abertas, essa alternância na posição de secagem é fundamental para diminuir os riscos de deformações. Quanto mais a placa for virada, menor o risco de deformações. Outro método que beneficia a secagem de placas passa por utilizar uma pressão na peça sob a forma de um peso, favorecendo a acomodação das partículas, bem como seu encolhimento [34].

As peças que demoram mais dias para serem construídas também merecem atenção quanto a secagem. Para mantê-la maleável por mais tempo, deve-se cobrir por inteiro com plástico, pois este mantém a humidade da mesma. Caso demore mais tempo que o previsto para finalização do trabalho e a peça seque mais do que o necessário para a continuação da modelagem, recomenda-se humedecê-la por inteiro, enrolando-a em pano húmido e deixando-a assim de um dia para o outro.

2.6.4. GESSO

O gesso é produzido a partir de uma matéria-prima rica em gipsita. Este mineral (gipsita) possui diversas aplicações pois apresenta facilidade de desidratação e re-hidratação.

A secagem é um dos passos fundamentais para a transformação do mineral gipsita em gesso. A gipsita é um mineral que se desidrata muito facilmente, sob a ação de calor, originando assim um composto semi-hidratado, conhecido por gesso [35].

Este processo de secagem chama-se de calcinação da matéria-prima, e ocorre a temperaturas que podem variar entre 125°C e 180°C. Existem vários tipos de fornos onde a calcinação pode ser executada.

Um dos métodos mais usados na secagem do gesso é o da secagem através do forno rotativo (ver Fig. 2.15). Nestes equipamentos, o minério moído entra em contato direto com a chama, que sai da zona de alimentação de calor. Ao ser calcinado, o minério percorre, através da gravidade, todo o comprimento do forno e a taxa e o tempo de secagem são controlados pela velocidade de rotação do tubo.

2.6.5. ARGAMASSAS

As argamassas são definidas pela junção de um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos, agregados, aditivos e/ou adjuvantes.

O tipo de materiais utilizados influencia as propriedades da argamassa, dependendo principalmente do tipo de aplicação e não apenas da época em que as argamassas foram aplicadas

A secagem faz parte do processo de formação das argamassas pois é necessária para o tratamento dos agregados que são constituintes das argamassas. Os agregados são maioritariamente calcários e siliciosos sendo que a secagem pode ser realizada através de secadores rotativos

3

SECAGEM EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

3.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS

Neste capítulo fez-se um levantamento de artigos existentes na comunidade científica que abordassem o fenómeno da secagem no plano dos materiais de construção.

Para a pesquisa destes artigos, foram selecionados aqueles que analisavam o fenómeno de secagem em materiais como o betão, o gesso, a argila, o tijolo (resultante da argila), a madeira e argamassas.

O objetivo passou por perceber quais as condicionantes na cinética e qualidade da secagem em materiais de construção. Para isso, os investigadores ao longo dos artigos variaram os fatores da cinética de secagem que são a velocidade e temperatura do ar e a humidade relativa. Fatores ligados às características dos materiais também podem ser importantes e por isso foram estudados, tais como: a variação da porosidade e porometria do material, a espessura do material e aditivos colocados na estrutura do material.

Para além, da variação dos fatores da cinética de secagem e das características estruturais do material, analisaram-se artigos que comparam diferentes mecanismos de secagem, desde métodos mais recentes como a secagem por micro-ondas ou secagem solar em estufa, a métodos mais tradicionais como secagem natural ou por ar aquecido.

3.2. ANÁLISE CRÍTICA SOBRE A APLICAÇÃO DE SECAGEM EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

3.2.1. MOROPOULOU ET AL (2004), "DRYING KINETICS OF SOME BUILDING MATERIALS"

Neste estudo, os investigadores quiseram testar o efeito de diferentes condições de secagem, como a temperatura do ar, a humidade relativa e a velocidade do ar no processo de secagem de vários materiais de construção.

Foram testados 3 tipos de materiais distintos, 4 tipos de pedra, 2 tijolos distintos e 7 tipos de gesso, sendo que para categoria de material foram escolhidos elementos com diferentes categorias microestruturais. No caso específico do gesso foi escolhida uma argamassa, mexida previamente, para evitar fenómenos de humidade, gesso tradicional de um edifício histórico e um produto baseado em cimento usado normalmente em edifícios modernos e históricos (ver Fig. 3.1).

Foram estimadas diferentes curvas de adsorção-desadsorção. A ação da absorção e libertação da água foi determinada graviticamente através da pesagem da amostra durante o processo. As linhas

isotérmicas foram estimadas para 3 temperaturas distintas (15°C, 25°C e 35°C) enquanto a humidade relativa andou de 10 em 10 entre 0 e 90 %.

O mecanismo de secagem usado foi um secador por ar convectivo, e para avaliar a cinética de secagem foram testadas 4 temperaturas distintas (20°C, 30°C, 35° e 45°C), 6 humidades do ar (30, 40, 50, 60, 70 e 80%) e 3 diferentes velocidades (1.3 e 8.0 m/s). Cada amostra usada tem como tamanho 3x3x3 cm e foi saturada previamente em água segundo a recomendação italiana Normal/20-85.

Os investigadores concluíram que o teor de humidade em equilíbrio é fortemente afetado pela temperatura e humidade do ar. Este teor de humidade é mais alto para baixas temperaturas e altos valores de humidade.

Verifica-se na maior parte dos exames analisados uma “histeresis” significativa nas curvas de adsorção- desadsorção (ver Fig. 3.1). Como esperado existe uma aceleração do processo de secagem devido ao aumento da velocidade do ar, quando esta passa de 1 para 8 m/s (ver Fig. 3.2). A variação da humidade do ar também faz variar o processo de secagem pois o tempo deste processo aumenta quando a humidade também aumenta (ver Fig. 3.2).

Tabela 3.1 – Materiais usados na investigação.

Material	Descrição	Código
Argila		
País: Itália	Tijolo feito a mão	BRI
País: Grécia	Tijolo feito a mão	BRM
Gesso		
Mexido previamente	Ideal para evitar fenómenos de humidade: cal hidráulica	PEM
Mexido previamente	Ideal para evitar fenómenos de humidade: cal aérea	PMP
Mexido previamente	Ideal para evitar fenómenos de humidade: cimento	PRL
Mexido previamente	Argamassa à base de cimento	PTI
Mexido previamente	Ideal para evitar fenómenos de humidade: cimento	PTR
Tradicional	De um edifício de Atenas do século 19:cal aérea	PZN1
Tradicional	De um edifício de Atenas do século 19:cal aérea	PZN2
Pedra		
Chipre	Arenito de pedra	SCY
Rhodes	Arenito de pedra	SRH
Rethimno	Arenito de pedra	SRY
Rethimno	Arenito de pedra	SWR

Foi possível perceber o efeito das condições de secagem no processo de secagem de diferentes materiais usados na construção (humidade relativa, velocidade e temperatura do ar). Um modelo de

secagem foi desenvolvido e permitiu prever tempos de secagem de materiais de construção com sucesso.

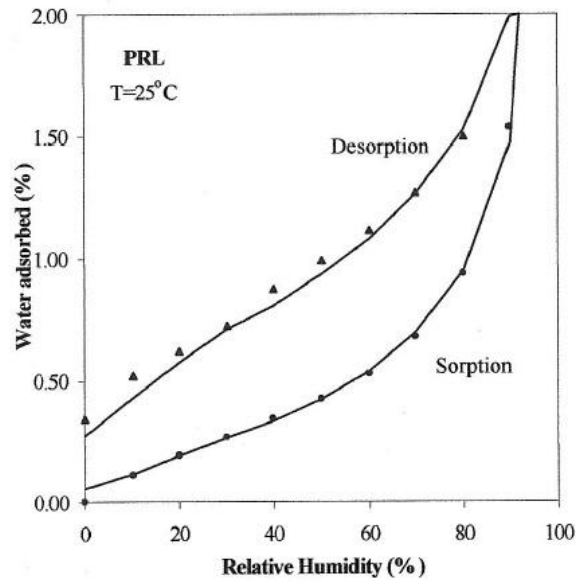


Figura 3.1 – Curvas de adsorção-desadsorção para o gesso.

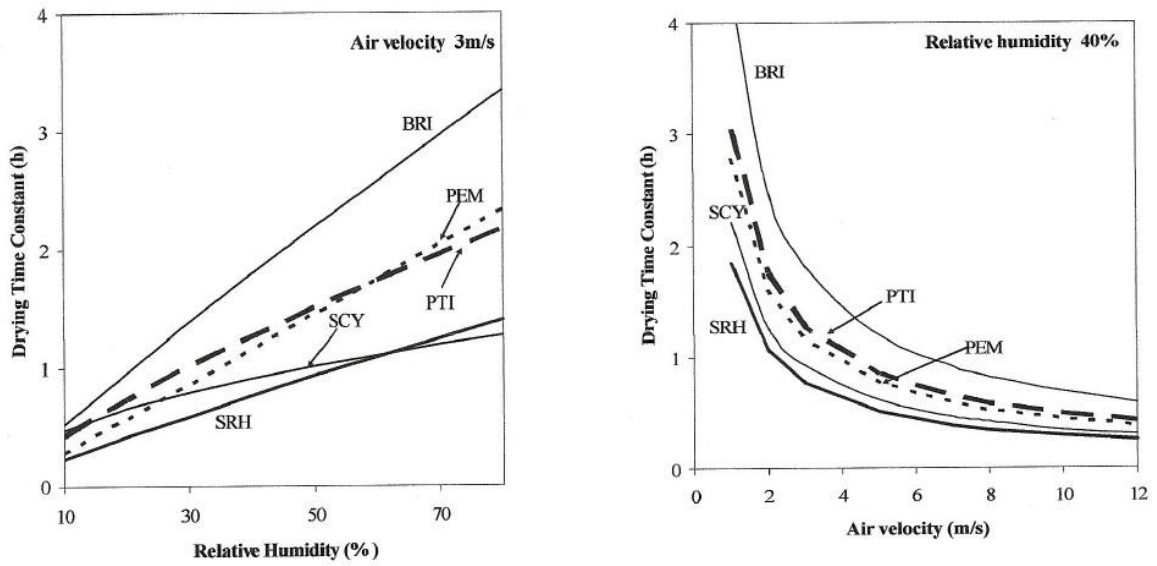


Figura 3.2 – Taxa de secagem em função da umidade relativa (esquerda) e taxa de secagem em função da velocidade do ar (direita).

3.2.2. MALAB ET AL (2009), "DRYING KINETICS OF SELF-COMPACTING CONCRETE".

O objetivo deste estudo passa por analisar a cinética de secagem em três tipos de betão distintos, comparando e analisando a influência da porosidade e porometria no processo de secagem.

Os investigadores consideraram três tipos de betão: o SCC (Self- Compacting Concrete), SC (Sand Concrete) e o OC (Ordinary Concrete).

O SCC é constituído por macroporos (tamanho de 1000 Å), o OC é constituído por microporos (100 Å) e macroporos e o SC é constituído por mesoporos (250 Å). Os poros do SCC e do SC são mais finos que o OC.

Para a investigação foi usada a mesma razão de água e cimento e a mesma força de compressão aos 28 dias. SCC tem os mesmos componentes que OC mas mais finos e quantidades maiores de superplastificante e estabilizadores usado. Por sua vez, SC apresenta uma composição distinta de OC, pois o betão areado usa apenas água, cimento mais a aplicação do superplastificante e enchimento de calcário.

Foram realizados três testes distintos com o objetivo de calcular a força de compressão (segundo a norma francesa – NFP 18-406), o módulo de elasticidade (através do teste de LCPC) e força de tensão (através do *cylinder splitting test* – ver Fig. 25). Para cada teste foi utilizado um cilindro com 11cm de diâmetro e 22 cm de altura.

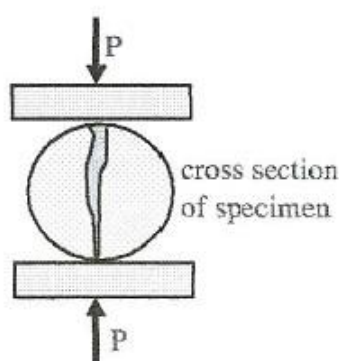


Figura 3.3 – Esquema ilustrativo do *cylinder splitting test*.

A cinética de secagem foi analisada através do método *gamma densimetry*. Trata-se de um método não destrutivo baseado na absorção de raios gama, que permite monitorizar a evolução da densidade em função da profundidade e do tempo. Para este método, foi usada uma amostra em forma de disco com 10 cm de diâmetro e 10 cm de espessura.

Depois de sujeitas a secagem por radiação as duas faces foram apertadas. A amostra é colocada num prato permitindo movimentos de rotação e verticais.

Quando SCC é sujeito a este teste verifica-se que é afetado por uma secagem rápida e uniforme. Ao fim de 90 dias a variação da densidade é de 65%, os gradientes de tensão não são significativos e a probabilidade de *cracking* é fraca (ver Fig. 3.4).

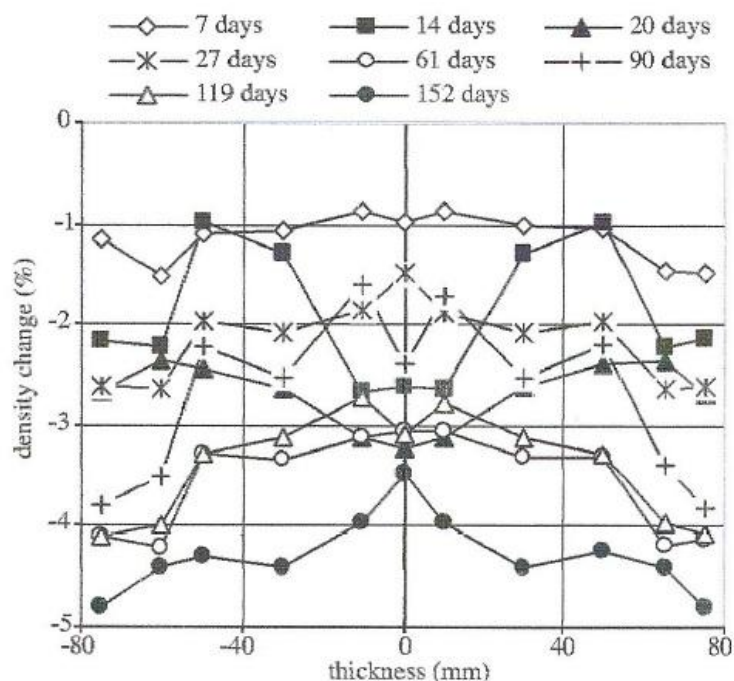


Figura 3.4 – Evolução da densidade ao longo do material (SCC).

O passo seguinte foi comparar a cinética de secagem de SCC com SC e OC, e analisar a influência do preenchimento de calcário na secagem uma vez que SC e SCC usam este material e OC não.

A Fig. 3.5 mostra que para OC se verifica uma baixa amplitude na variação da densidade sujeita a secagem, implicando gradientes hidráulicos e consequente aumento da probabilidade de cracking na amostra.

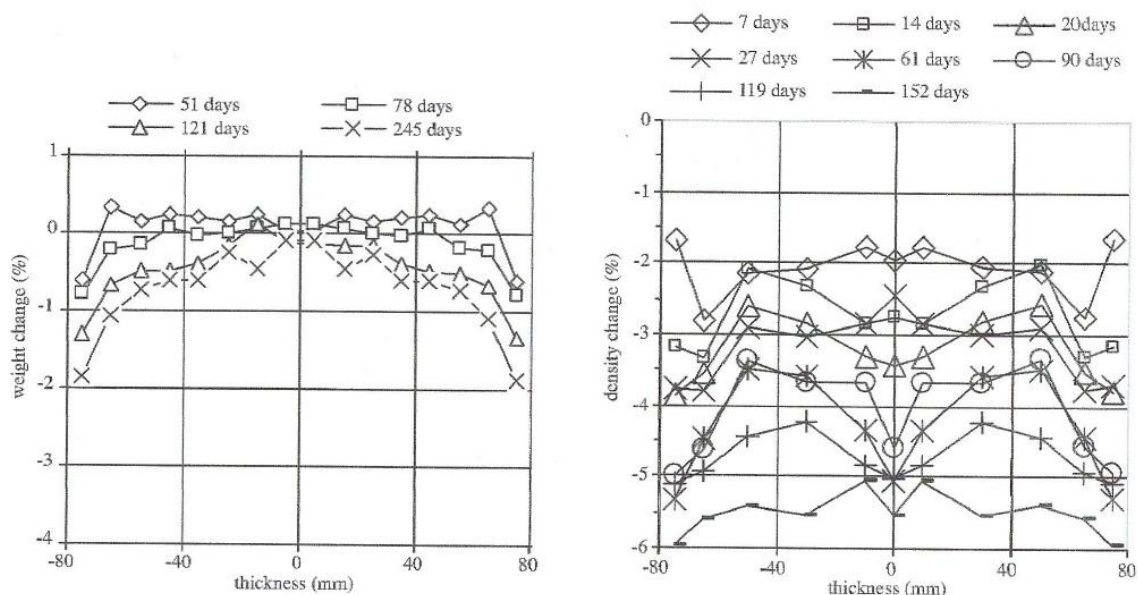


Figura 3.5 – Evolução da densidade ao longo de SC (esquerda) e OC (direita).

Tal como SCC, a secagem é rápida e uniforme e apresenta uma amplitude de 80% ao fim de 90 dias. Gradientes hidráulicos e de tensão fracos e logo baixa probabilidade de *cracking*.

A explicação pode estar no preenchimento de calcário efetuado em SCC e SC com o intuito de completar a distribuição granulométrica, melhorando a sua capacidade granular e para modificar a porometria.

Para os investigadores a porometria parece ter um papel determinante na cinética de secagem. Foram então, analisados 3 fragmentos de SCC e SC. Os resultados desses fragmentos foram semelhantes, por isso apenas se analisaram um desses fragmentos.

O principal objetivo foi comparar o MIP (Mercury intrusion porosimetry) dos 3 betões, as amostras de SCC e OC apenas continham cimento hidratado por restrições práticas. Foram secadas num forno a 110°C durante 48h depois de 28 dias de cura e colocadas num dessecador de gel sílica antes de serem testadas.

Grande quantidade de preenchimento de calcário é incorporada em SCC e SC completando assim a distribuição granulométrica, reduzindo o volume capilar e fortalecendo o fator de preenchimento.

O uso de menor calcário em conjunto com o agente viscoso (SCC) reduz menos o volume em comparação com a aplicação de maiores quantidades de calcário em conjunto com o superplastificante (SC).

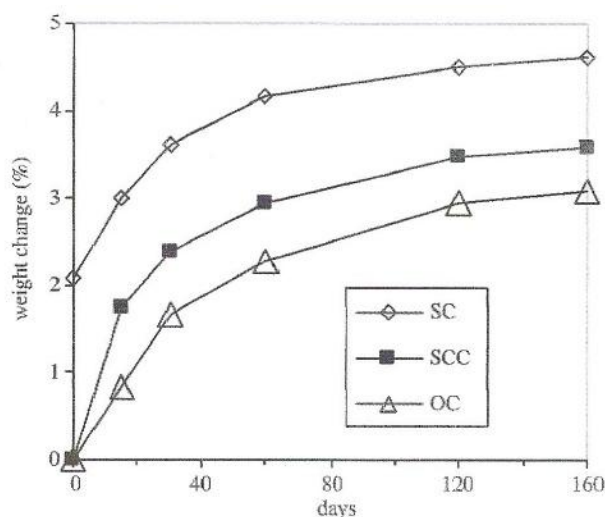


Figura 3.6 – Variação do peso ao longo tempo nos 3 materiais.

Os testes mostram que o preenchimento de calcário não se comporta apenas como um inerte, mas contribui para as reações de hidratação. Os poros são mais pequenos em SC e foi mexido sem agregado.

O que surpreendeu mais os investigadores foi o fato de SC ter uma melhor cinética de secagem que SCC que deveria teoricamente ser mais rápida devido ao maior impacto na secagem dos macroporos em comparação com os mesoporos.

Em função desse resultado foram testados 3 amostras prismáticas com (7x7x28 cm) para se obter curvas com a perda de peso ao longo do tempo.

Estas curvas mostram que SC perde mais 20% de peso comparando com SCC. Comparando com OC, SCC perde mais pois a sua estrutura é mais fina, relacionado com o uso do preenchimento, responsável pelo refinamento dos poros capilares (ver Fig. 3.6).

Como já foi referido, a diferença da estrutura influencia a cinética de secagem. Por um lado, os investigadores defendem uma secagem rápida e uniforme para SCC e SC, por outro a secagem é lenta

no centro da amostra e rápida na periferia (não uniforme) para OC. Os gradientes hídricos são significativos em OC gerando gradientes de tensão, provocando o risco de cracking. No caso de SCC e SC não se geram gradientes com relevância.

A causa pode estar no facto de SC ter poros mais orientados e menos tortuosos em comparação com SCC, privilegiando assim a secagem (os poros apresentam uma maior conectividade).

Esta tese é apoiada pela permeabilidade. SCC precisa de 7,8 MPA para drenar em 24h a água interior enquanto SC precisa apenas de 5,8 MPA. A permeabilidade aumenta com a fraca conexão dos poros.

SCC tem uma granulometria mais ampla em comparação com SC. O agregado leva a uma maior tortuosidade o do SCC em relação a SC, esta tortuosidade adicional leva à redução da cinética na transferência hídrica.

Como conclusões gerais os investigadores confirmam a existência de uma estrutura porométrica monomodal (apenas um tipo de poro, neste caso macro) para SCC, meso para SC e macro e micro para OC. A cinética de secagem é uniforme e maior que OC no entanto é inferior a SC contrariando o que seria expectável uma vez que apresenta uma estrutura de macroporos.

A cinética de secagem é afetada pela tortuosidade e pela conexão dos poros em cada material. A conectividade de SCC é inferior a SC, reduzindo assim a transferência de água. Esta maior conectividade de SC explica-se pela quantidade de material de preenchimento introduzido, que nesta experiência foi maior em SC.

Os parâmetros a ter em conta são: distribuição do tamanho dos poros; grau de conectividade dos poros; tortuosidade e orientação. Todos estes parâmetros a ter em conta estão relacionados com a quantidade injetada de calcário em conjunto com um superplastificante e/ou agente viscoso.

3.2.3. KRUS E HOLM (2009), "SIMPLE METHOD TO APPROXIMATE THE LIQUID TRANSPORT COEFFICIENTS DESCRIBING THE ABSORPTION AND DRYING".

Neste estudo, os investigadores tiveram como objetivo comparar o coeficiente de transporte líquido nas duas fases distintas, a de adsorção e a de desadsorção (secagem), criando um método capaz de calcular esses coeficientes.

A obtenção destes dois coeficientes é possível através de ensaios com radiografias gama ou ressonâncias núcleo magnéticas. No entanto, estes ensaios são bastante morosos e caros.

Segundo os investigadores, é possível obter boas aproximações a estes dois coeficientes, através de procedimentos que tem como base o conhecimento de parâmetros básicos dos materiais de construção e a realização de simples ensaios adicionais.

O cálculo generalizado do coeficiente líquido de transporte pode ser expresso pela seguinte equação:

$$D_w(u) = D_{w0} \cdot e^{\left(\frac{u}{u_f} \cdot \ln \frac{D_{wf}}{D_{w0}}\right)} \quad (3.1)$$

Em que:

D_{wf} - Coeficiente líquido de transporte para saturação capilar [m²/s]

D_{w0} - Coeficiente líquido de transporte para sorção de humidade [m²/s]

u_f - Teor de humidade de sorção para saturação capilar [Vol.%]

O passo seguinte do investigador foi perceber quais são os dois métodos a usar para calcular o coeficiente de transporte para a absorção e o coeficiente de transporte para a desadsorção (secagem).

Para o processo de adsorção foi usada a equação (3.2), que resulta derivando a equação (3.1).

$$D_{wf} = \frac{K \cdot \pi \cdot A^2 \cdot \ln \frac{D_{wf}}{D_{w0}}}{4u_f \cdot (u_f - u_{80})} + D_{w0} \quad (3.2)$$

Em que :

u_{80} - Teor de humidade de sorção para 80% de Humidade relativa [Vol.%]

$D_{w0} = 2,0 \times 10^{-10}$ [m²/s]

K - Fator de correção [-]

Para a determinação do D_{ww} (coeficiente líquido de transporte para a desadsorção) foi usado um programa de simulação de calor e humidade (WUFI). Foram estabelecidos dois passos necessários para se efetuar o cálculo: o coeficiente de transferência de calor tem de ser determinado, por isso o valor por defeito de 8W/m²K é aumentado; D_{ww} é adaptado até que o desvio entre o calculado e o medido seja mínimo. Os resultados para os sete materiais de construção escolhidos para análise estão na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Variação do peso ao longo do tempo nos 3 materiais.

Material	u_{80} [Vol.%]	u_f [Vol.%]	w [kg/m ² h ^{0,5}]	D_{wf} [m ² /s]	D_{ww} [m ² /s]	D_{wf}/D_{ww} [-]
Baumberger	3,6	21	2,6	$2,25 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	2
Obernkirchner	0,28	9	2,8	$1,15 \times 10^{-6}$	Indetermi.	-
Ruthener	1,2	18,5	18	$9,7 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-6}$	3
Sander	1,9	12	1,2	$1,24 \times 10^{-7}$	$4,13 \times 10^{-8}$	3
Lime sílica brick	2,5	25	3,2	$3,14 \times 10^{-7}$	$6,3 \times 10^{-8}$	5
Brick	0,31	34	15	$5,38 \times 10^{-6}$	$3,58 \times 10^{-6}$	1,5
Gypsum palster	0,79	35	5,1	$2,00 \times 10^{-7}$	Indetermi.	-

Como conclusão foi apresentado um novo método que permite estimar os coeficientes de absorção de água através de propriedades dos materiais já amplamente conhecidas (capilaridade de saturação livre, teor de humidade e coeficiente de absorção de água). O processo de secagem apresenta coeficiente de transporte líquido mais pequenos que na outra fase (adsorção). Por fim, é apresentado um novo método para o cálculo desses coeficientes a partir de uma simples experiência de secagem em que os desvios encontrados são moderados e aceitáveis em relação à realidade.

3.2.4 HASATANI ET AL (1993) "CONTRACTION CHARACTERISTICS OF MOLDED CERAMICS DURING DRYING".

Neste artigo, os investigadores analisaram as características de secagem e contração de cerâmicos para clarificar os efeitos que estes têm no processo de secagem.

O esquema de secagem foi constituído por um canal com 50 mm de espessura, um aquecedor por ar, um secador e uma balança. O tamanho interior da zona de corte do canal foi de 200x200 mm e o seu comprimento de 700 mm. Diversas camadas de uma rede de aço foram usadas como distribuidores nos

dois lados do canal. O ar quente foi aplicado dentro do canal através de aquecimento elétrico. Este esquema está demonstrado na Fig. 3.7.

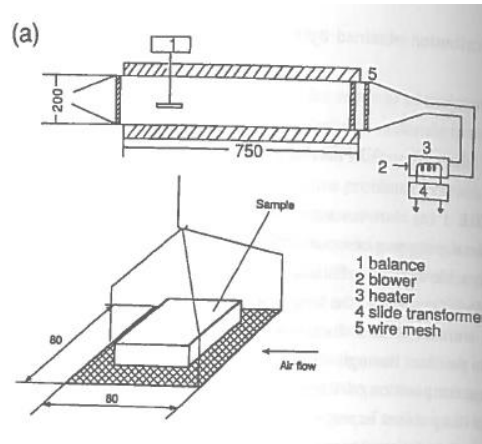


Figura 3.7 – Variação do peso ao longo tempo nos 3 materiais.

A argila usada foi a do tipo Mikawa-Sanshu, apropriada para a produção de telhas. O teor de humidade inicial para a argila foi de $0,245 \text{ Kg} - \text{Kg/Kg}$ e a densidade foi de $2,01 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$.

As amostras foram moldadas em formas de esferas ou numa forma semelhante a uma laje. O tamanho das esferas variou entre 20,40 e 60 mm enquanto para as lajes os tamanhos foram de 60x60x6mm, 60x60x10 mm e 60x60x15 mm.

O comportamento do peso de cada amostra durante a secagem foi medido através de uma balança elétrica (Shinadzu, ED-200). Foram determinadas as taxas de secagem através do gradiente de peso em função do tempo.

As amostras foram periodicamente retiradas da zona de teste para a medição da variação do volume através da contração durante a secagem. O volume de cada amostra foi estimado através da média do diâmetro de cinco posições diferentes para cada diâmetro, no caso das esferas, enquanto no caso das placas o tamanho foi medido recorrendo a posições marcadas inicialmente em cada amostra recorrendo a um marcador.

Estes valores retirados experimentalmente foram posteriormente comparados com os resultados recorrendo a um equação de difusão (3.3) para uma dimensão adaptada para as amostras.

$$\frac{\partial W}{\partial \theta} = D_w \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial W}{\partial r} \right) \quad (3.3)$$

O cerâmico analisado foi a argila, e os resultados das experiências foram comparadas com os resultados teóricos obtidos a partir da equação de difusão. Os investigadores concluíram que a argila contrai principalmente no pré-aquecimento e quando a taxa de secagem permanece constante, sendo que existe uma ligeira variação de volume durante o período de queda da taxa de secagem, devido à água que existe nos espaços entre as partículas que estão em contato entre si poder ser removida (ver Fig. 3.8 e 3.9). O comportamento da contração durante a secagem depende das condições de secagem (ver Fig. 3.10) e não apenas do teor de humidade.

Quanto maior for a taxa de secagem mais o volume da argila contrai para amostras esféricas, pois o gradiente de distribuição de humidade nas amostras pode causar compressão significativa na parte interior das amostras.

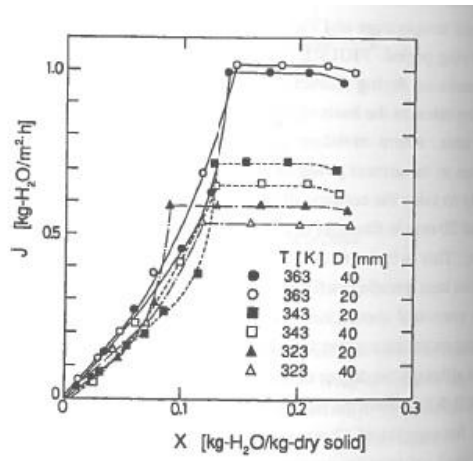


Figura 3.8 – Curva característica de secagem.

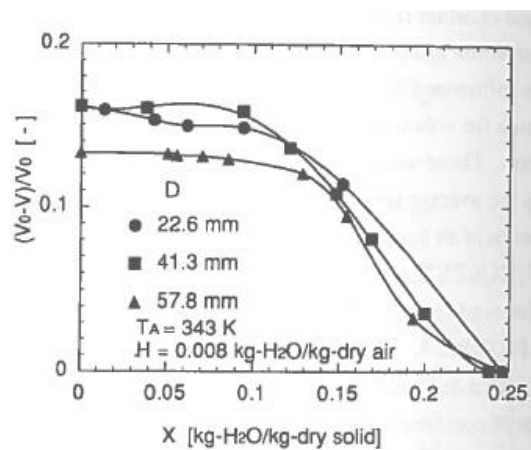


Figura 3.9 – Efeito da temperatura do ar na contração.

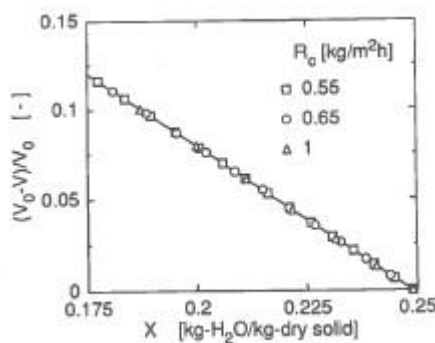


Figura 3.10 – Contração em função da taxa de secagem.

3.2.5 ITAYA ET AL (2004) "DRYING ENHANCEMENT OF CLAY SLAB BY MICROWAVE HEATING".

Neste artigo, os investigadores pretenderam analisar o efeito interno de aquecimento por micro-ondas no comportamento de secagem de uma placa de argila. O comportamento foi estudado comparando a

secagem por micro-ondas, com outros dois métodos de secagem: aquecimento por ar quente e aquecimento por radiação através de um forno específico.

O mecanismo do ensaio é composto por um canal de aço com 100x100 mm na secção de corte e 500 mm de comprimento. A zona de teste está localizada no centro da conduta e um prato de 50 mm de diâmetro para receber a amostra está ligado a uma balança elétrica, para medir o comportamento do peso em função do tempo durante a secagem.

As micro-ondas geradas num “magnetron” (Tokyo Electronics Inc. IMG-25015) foram transmitidas para as amostras através de uma junta onde as ondas são guiadas. A frequência usada foi de 2450 MHz e a potência variou entre os 100 e os 1000 W.

A secagem por convecção pode ocorrer simultaneamente neste protótipo através da entrada de ar quente na conduta, então para simular a secagem por convecção apenas se desativa a emissão de micro-ondas. O forno de secagem para a radiação usada foi o Drying Oven DX31.

As amostras foram preparadas através da moldagem de Kaolin (Caulino) numa placa, consistindo numa mistura de 50 g de pó de caulino com 20 g de água e pressionados num molde com uma força de pressão de 200 kpa. O tamanho da amostra foi de 60x60x10 mm. As experiências de secagem também foram feitas para um tijolo com as mesmas dimensões que a placa de caulino e foi imersa previamente por uma hora. O tijolo foi escolhido como uma amostra *standard*, pois não contrai nem altera a sua estrutura, sendo útil para comparar cada uma das características com as restantes amostras, através da secagem por micro-ondas.

A taxa de secagem foi determinada pela medição do peso ao longo do tempo medido através da balança existente no mecanismo concebido para esta experiência. As transferências das temperaturas foram medidas por tipos de luminescência de um termómetro de fibra óptica (Adachi Instrument, FX-8500) colocado no centro e na superfície da amostra. A intensidade do campo elétrico foi determinada pelo mesmo método usado por Yoshida et al em 1996.

Os investigadores concluíram que a intensidade da penetração por absorção da micro-onda no material molhado foi proporcional à exponencial do produto do teor de humidade e espessura (thickness).

O comportamento da transferência da secagem por micro-ondas foi significativamente diferente da secagem convencional por ar quente ou por aquecimento por radiação emitida dentro de um forno próprio.

Durante a secagem a temperatura e a taxa de secagem variaram com muita frequência. O *cracking* na amostra foi gerado por expansão devido à pressão interna de vapor quando a temperatura interna atingia o ponto de fervura ou os 370K, enquanto, que para a secagem por convecção e radiação (no forno) causou *cracking* na superfície da amostra devido à indução do “strain-stress” num período de secagem inicial.

Se a energia fornecida pelo micro-ondas for controlada de forma, a que a temperatura interna não atinja os 370K a secagem interna melhora significativamente comparando com os outros dois métodos abordados, evitando ainda a criação de *cracking*, melhorando também o tempo de secagem.

3.2.6 ASAMI (2004) “DRYING OF FINE CERAMICS”

O mecanismo de secagem dos cerâmicos moldados, bem como alguns métodos para a eliminação de defeitos produzidos pela secagem, são revistos neste artigo. São ainda propostas formas de secagem como a elétrica a dielétrica de forma a minimizar defeitos inerente a estes processos.

A Fig 3.11 mostra o processo de contração de um corpo de argila. Essa contração ocorre durante o período de taxa de secagem constante e na primeira fase de queda da taxa de secagem.

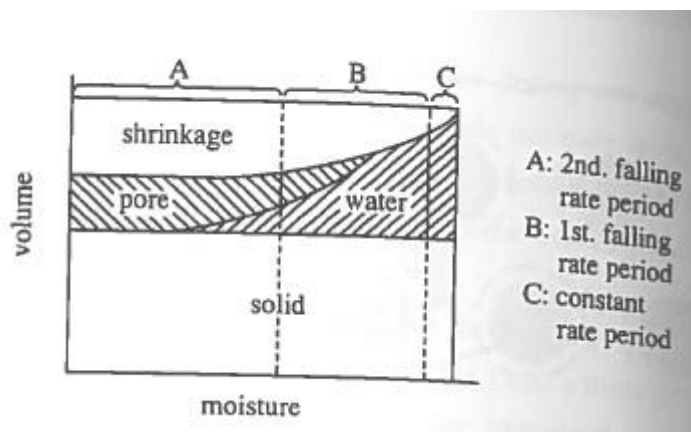


Figura 3.11 – Comportamento da contração num material contendo argila.

O investigador propôs algumas normas para evitar a deformação ou o fenómeno de *cracking* do material. A deformação ocorre facilmente quando o corpo é largo, pesado e sujeito a vibração durante o seu transporte. A deformação do peso e o *cracking*, fenómeno que ocorre num corpo quando as forças de tensão na superfície são maiores que as do material causando uma diferença entre a contração à superfície e no interior, podem ser prevenidos segundo Asami (2004) através de: escolha de *binders* (material ou substancia que aglutina outros corpos tornando-os coesivos mecanicamente) para otimizar a rigidez do corpo depois de ter sido moldado; escolha de agentes ativos da superfície que otimizem a rigidez do corpo com menos água; aplicar alta pressão ou moldagem a vácuo; aplicar calor interno para facilitar a secagem uniforme.

É mais fácil moldar o corpo a baixas temperaturas, e um aumento ligeiro da temperatura imediatamente após a moldagem aumenta a viscosidade do corpo e aumenta a resistência à deformação.

A secagem por congelação é também efetiva durante o processo de secagem para manter a forma do corpo do cerâmico. Este método resulta de uma combinação entre a secagem por vácuo onde a água no corpo é congelada e removida por sublimação a uma temperatura inferior a 0,0075°C da água.

“*Twisted and Warping*” são deformações causadas pelo relaxamento, pela orientação das partículas e por um aquecimento improprio do corpo moldado. Estas deformações segundo Asami (2004) podem ser reduzidas se: a pressão no material for uniforme; ajustar a estrutura de moldagem; aquecer a superfície uniformemente; circulação uniforme do ar quente e secagem húmida.

As mudanças químicas e físicas ocorrem durante a secagem, por exemplo, o uso direto da exaustão do ar do forno de queima pode contaminar o corpo do cerâmico com impurezas, por isso uma limpa troca de ar deve ser usada como fonte de calor para secagem.

A alteração da densidade no cerâmico é considerada uma mudança física. Na Fig. 3.12 pode-se ver a mudança de contração durante a evolução da taxa de secagem. Quanto maior for a taxa de secagem menor será a densidade do corpo seco. acontecendo sobretudo para a fase de secagem constante.

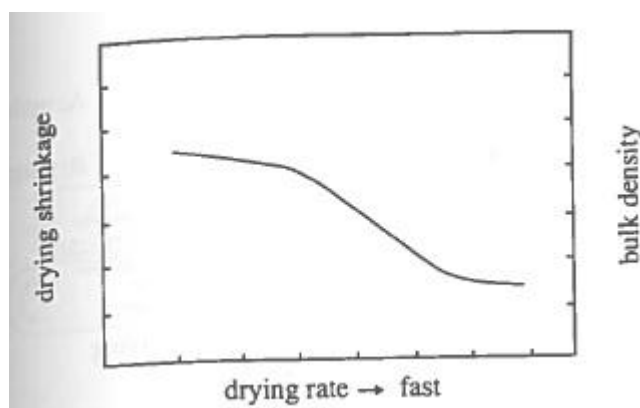


Figura 3.12 – Densidade aparente e contração em função da taxa de secagem.

Importa agora referir os conselhos dados por Asami no uso de dois mecanismos distintos de secagem. O aquecimento elétrico reduz o tempo de secagem. Durante a secagem de um grande corpo a diferença do teor de humidade da superfície com o teor no interior é bem maior comparativamente à diferença verificada num corpo cerâmico considerado pequeno. Portanto o tempo necessário para se obter uma secagem livre do fenómeno de *cracking* é maior para um corpo de maiores dimensões.

Outros dois métodos propostos de secagem pelo investigador são a secagem por micro-ondas e a secagem dielétrica. A diferença entre os dois métodos de secagem é: a secagem por micro-ondas usa frequências mais altas e é aplicada diretamente no corpo enquanto a secagem dielétrica é aplicada de forma indireta e alternada por dois elétrodos paralelos. O estudo mostra que a secagem por micro-ondas reduz o tempo de processamento, a energia consumida, e aumenta a produtividade e a relação custo/performance está mais otimizada.

Como conclusão geral, os mecanismos de secagem, os efeitos causados durante o processo de secagem e medidas preventivas foram propostas por Asami. Existem muitos problemas térmicos durante a secagem, e estes são ainda mais complicados para os *fine ceramics* (cerâmicos finos). Estes problemas podem ser evitados através de uma melhoria da tecnologia de secagem, bem como da tecnologia dos materiais e da moldagem efetuada. Por isso uma norma com os procedimentos globais do processo de secagem deve ser criada para servir de guia aos agentes envolvidos na indústria de secagem como os produtores de secadores ou os agentes responsáveis pela secagem de produtos.

3.2.7 BRANCO ET AL (2007) “AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO TEMPO DE SECAGEM DE ARGAMASSAS DE AGREGADOS LEVES”

Este artigo procura contribuir para a sistematização do conhecimento sobre a secagem de argamassas de regularização. É descrito um trabalho laboratorial para comparar o processo de secagem natural e em estufa, de diferentes tipos de argamassas leves.

Os investigadores procuraram ainda caracterizar o tempo de secagem das argamassas, quantificando o ritmo de perda de humidade por evaporação e as condições de humidade relativa das argamassas estudadas.

Neste estudo, analisaram-se quatro tipos de argamassas, sendo que para cada argamassa foram introduzidos diferentes tipos de agregados leves: granulados de cortiça expandida (ACExp) com granulometria 3/5 e /10, argila expandida (AAExp) com granulometria 3/8, granulado de poliestireno

(APexp) e introdutor de ar (AAER). De referir que todas as argamassas produzidas possuíam a mesma razão água/cimento ($a/c=0,40$). O cimento usado foi o cimento Portland Normal 32,5 (ver Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Critérios escolhidos para a constituição das argamassas.

Argamassa	Constituintes (kg/m ³)				Massa Volúmica (kg/m ³)
	Água	Cimento	Areia	Agregados leves	
ACExp	143	353	612	3.05 (GCE 3/5)	1870
				7.86 (GCE 5/10)	
AAExp	143	353	612	58.7 (AExp 3/8)	1880
APExp	143	353	612	1.26 (P.Exp.)	1780
AAER	143	353	612	0.52 (Introdutor de ar)	1930

Foram criados provetes prismáticos de argamassa com 10x20 cm² para 4 espessuras distintas (5,7,8 e 10 cm). Todos os provetes foram selados em 5 faces e o processo de secagem foi sempre realizado na direção da face não isolada (face superior).

Em cada provete foram criados dois furos (A_1 e A_2) de 8 mm de diâmetro para a medição da humidade relativa exterior. O furo A_1 variou de profundidade consoante a espessura do provete, pois foi sempre feito para meia altura, assim foram feitos furos com 2,5; 3,5; 4,0 e 5,0 cm de profundidade respetivamente para as espessuras 5, 7, 8 e 10 cm. O furo A_2 foi colocado nos provetes a 2,5 cm da superfície (ver fig. 3.13)

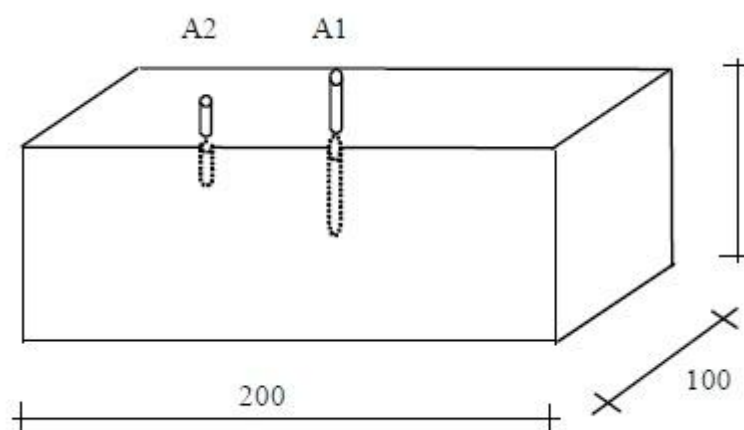


Figura 3.13 – Esquema ilustrativo de um provete e os furos realizados.

Durante o processo de secagem foi determinada a perda de peso ao longo do tempo e a humidade relativa exterior, no interior dos provetes (A_1) e a uma profundidade de 2,5 cm em relação a superfície da face superior (A_2).

Terminada a moldagem, os provetes foram guardados durante 1 dia nos moldes, sob uma temperatura de $\pm 18^\circ\text{C}$ e $\pm 50\%$ de humidade relativa. Passadas as 24 horas, os moldes foram retirados e revestiu-se com uma película de polietileno todas as faces do provete com exceção da face superior, de forma a garantir o isolamento perante a secagem. Os provetes durante o ensaio foram mantidos para condições

de temperatura e humidades constantes ($T=20\pm1^{\circ}\text{C}$ e $HR=50\pm2\%$). O registo dos dois parâmetros de saída pretendidos (temperatura e humidade) foi executado por um *datalogger*.

Efetuarão-se testes laboratoriais que procuraram quantificar a quantidade de água libertada ao longo do processo de secagem e o ritmo a que ocorria a secagem. Paralelamente, avaliou-se o valor da humidade relativa no interior dos provetes de argamassa durante o período de secagem.

Os resultados obtidos permitiram verificar que a quantidade de água evaporada aumenta com o aumento de espessura dos provetes, sendo este facto mais evidente nos provetes que continham cortiça ou introdutor de ar.

A velocidade de evaporação (g/h) apresenta um valor mais elevado no período após a betonagem, diminuindo depois ao longo do tempo. Na argamassa com poliestireno, observou-se a existência de um período inicial (aproximadamente uma semana) em que a velocidade de evaporação se mantém aproximadamente constante. Nas restantes argamassas contendo agregados leves, este período inicial não é tão nítido, não apresentando a argamassa com introdutor de ar quaisquer sinais deste patamar.

Das argamassas analisadas, verificou-se que a argamassa com introdutor de ar apresentou a velocidade de evaporação inicial mais elevada, sendo seguida pela argamassa com cortiça e com argila. A argamassa contendo poliestireno apresentou a velocidade de evaporação mais reduzida.

Verificou-se que a humidade relativa, a uma profundidade igual a metade da espessura, apresentou, ao fim de uma semana, valores superiores a 80%. Quando comparadas argamassas com espessura idêntica, os provetes contendo argila expandida e poliestireno apresentaram diminuições mais lentas do valor de humidade relativa.

3.2.8 INNOCENTINI ET AL (2003) “EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA NA SECAGEM DE BETÃO REFRATÁRIO”

Este trabalho teve como objetivo investigar o efeito da distribuição granulométrica sobre parâmetros de permeabilidade, porosidade aparente e secagem do betão refratário de alta alumina. Para a concretização desse objetivo realizaram-se ensaios de permeabilidade ao ar à temperatura ambiente para relacionar o tipo de poros no betão com a facilidade de escoamento dos fluidos, ensaios de permeabilidade em temperaturas elevadas para acompanhar a decomposição de hidratos e análises termogravimétricas que permitiram associar as características da estrutura com a facilidade de eliminação de água durante o processo de secagem.

Betões refratários com altos teores de alumina e baixos teores de cimento foram formulados de acordo com o modelo de empacotamento de Andreasen. As variáveis foram o coeficiente de distribuição (q) da curva granulométrica (0.21, 0.26 e 0.31) e a distribuição discreta (tamanho dos agregados) de partículas das matérias-primas: MGAG, MGAF, MFAG e MFAF, onde as iniciais significam: M = Matriz, A = Agregado, G = Grosso, e F = Fino.

O primeiro parâmetro, coeficiente de distribuição, representa a quantidade relativa entre matriz e agregado, enquanto o Segundo, distribuição discreta de partículas das matérias-primas, quantifica a relação de tamanhos das partículas das frações de agregados e matriz, para uma mesma distribuição acumulada (teor dos agregados).

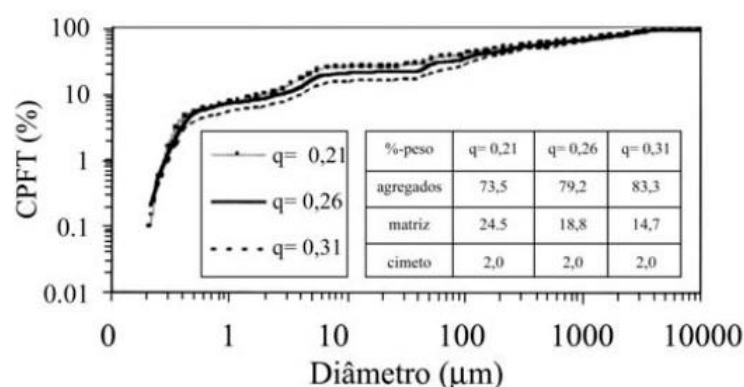


Figura 3.14 – Curvas de distribuição acumulada segundo o modelo de Andreasen para os betões.

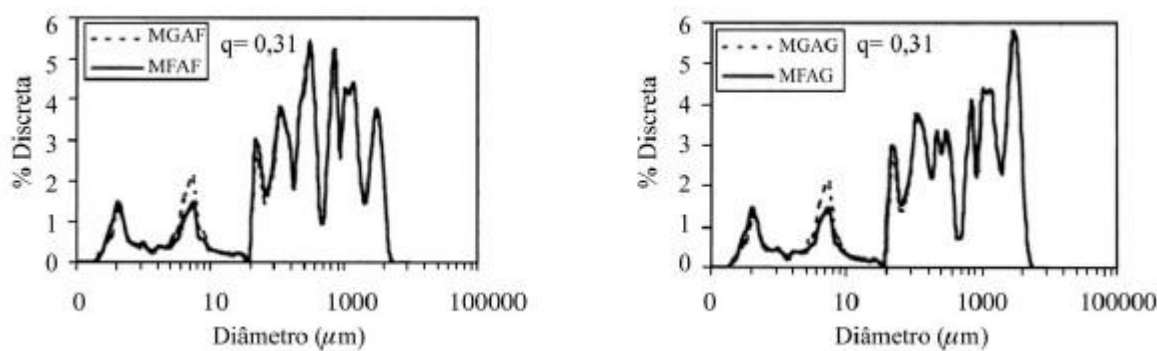


Figura 3.15 – Distribuições discretas utilizadas na formulação dos betões analisados neste trabalho ($q=0,31$).

Em todas os betões formulados os investigadores mantiveram como constantes os teores de água (15% volume) e de cimento de aluminato de cálcio (2% peso). Todas as matérias-primas AEB 4/10, AEB 200F, A1000SG e as medidas de porosidade aparente foram realizadas pelo método de Arquimedes conforme a norma ASTM C20-92. Considerou-se $\mu_{ar} = 1,8 \times 10^{-5}$ Pa.s, $p_{ar} = 1,08 \text{ kg/m}^3$, $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ e $p_{atm} = p_s = 690 \text{ mm.Hg}$.

Os ensaios de permeabilidade em alta temperatura foram realizados num permeâmetro. A técnica consistiu na passagem de ar, sob pressão constante, através de amostra com mesmas dimensões àquelas usadas nos testes de permeamtria à temperatura ambiente.

O monitoramento simultâneo da temperatura de entrada, de saída e da vazão de ar na saída da amostra permitiu a verificação de transformações mássicas, térmicas e fluidodinâmicas durante o processo de desidratação do betão. Os ensaios foram realizados com taxa de aquecimento de 5°C/min na faixa de 25 a 700°C .

A análise gravimétrica durante a secagem foi feita em ensaio à temperatura constante (110°C) num equipamento desenvolvido em laboratório, monitorando-se a temperatura e a massa da amostra (250 g) em função do tempo. Neste ensaio, não foi investigada a saída de hidratos, mas apenas a facilidade de saída de água livre. Para isso, os corpos, previamente secos a 110°C foram saturados em água para preenchimento de todos os poros. O parâmetro de análise foi a humidade residual do corpo.

Os resultados indicam que existem dois mecanismos que controlam a permeação de fluidos no betão. Os poros na matriz, responsáveis pela retenção de água no betão, têm porosidade e permeabilidade controlada pela distribuição discreta de partículas da matriz. Por outro lado, os poros originados na

interface matriz-agregado são responsáveis pela geração de atalhos para a eliminação de água para fora da estrutura. A quantidade e o tamanho desses poros estão relacionados à distribuição acumulada (teor de agregados) e pela distribuição discreta (tamanho dos agregados). Em geral, corpos com agregados finos foram os mais permeáveis, enquanto corpos com matriz grossa foram os que apresentaram melhor desempenho durante a secagem.

Pela Fig. 3.16a) é possível que um aumento do teor de agregados favoreça a secagem, aumentando a sua velocidade, sendo máxima para a composição $q=0,31$. Na Fig. 3.16b), para o mesmo teor de agregado, os corpos MG são mais efetivos que os de matriz fina.

A Fig. 3.17 mostra o perfil de permeabilidade durante o tratamento térmico das amostras com diferentes distribuições acumuladas, destas amostras eliminou-se a humidade residual, de forma que fosse possível apenas analisar a decomposição de hidratos durante o ensaio de permeabilidade.

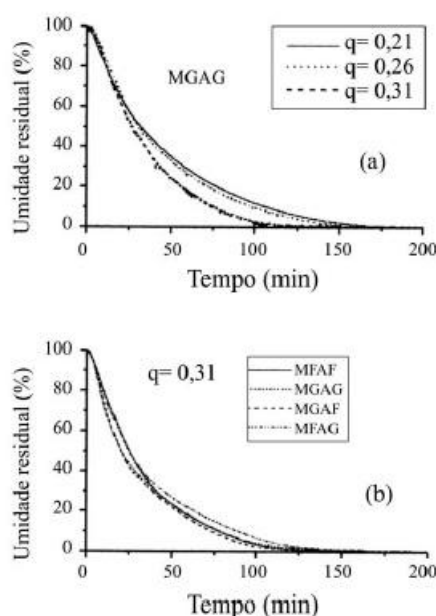


Figura 3.16 – Variações observadas na secagem em temperatura constante (110°C) de um betão refratário em decorrência de alterações na distribuição acumulada (a) e na distribuição discreta de partículas de suas matérias-primas (b).

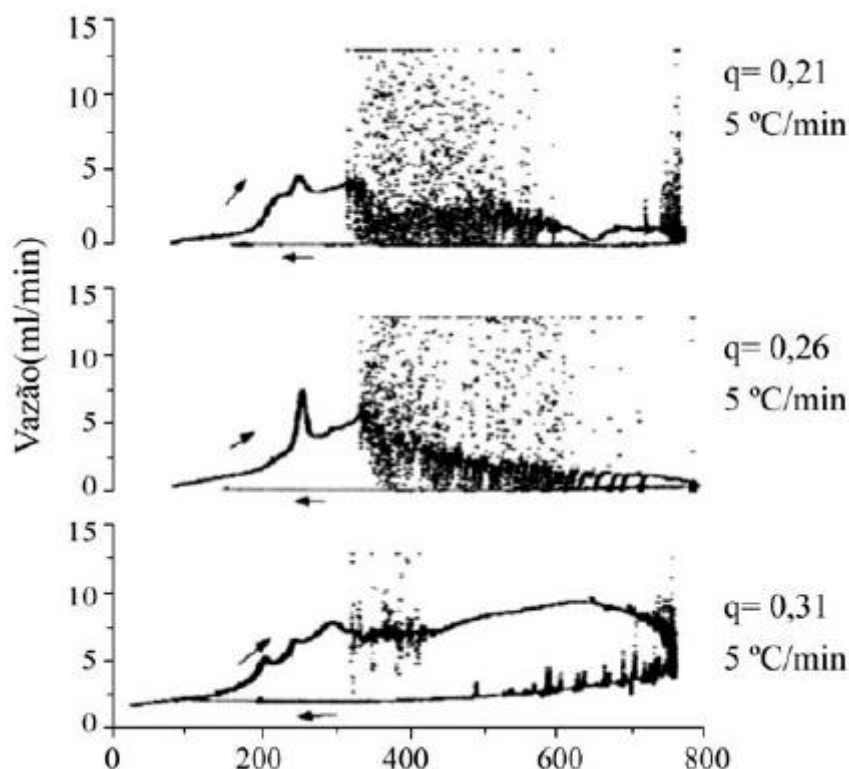


Figura 3.17 – Variações observadas no perfil de permeabilidade e de saída, de hidratos em altas temperaturas decorrentes de alterações na distribuição acumulada de partículas das matérias-primas de um betão refratário.

Conclui-se que para $q=0,31$ um menor nível de turbulência na saída dos hidratos, indicando uma maior facilidade de escoamento de vapor de água e confirmando que o aumento do teor de agregados favorece a permeação de fluídos e consequentemente a eliminação de água durante a secagem.

É também possível concluir que, é a permeabilidade da matriz o fator determinante para a secagem. A atuação conjunta de uma matriz porosa e permeável com uma rede de poros interfaciais permeáveis e pouco tortuosos parece para os investigadores ser a melhor combinação para a obtenção de uma secagem rápida e eficaz.

3.2.9 HASELEIN ET AL (2009) “USO DE ESTUFA SOLAR PARA A SECAGEM DE MADEIRA SERRADA ”

O principal objetivo deste estudo foi analisar o uso de estufa solar como mecanismo de secagem de madeira, e também comparar esse mecanismo com a secagem natural ao ar livre. Para essa análise foi desenvolvido um secador solar constituído por estruturas de madeira, cobertura com dupla camada de plástico PVC, sistema coletor interno de energia solar e sistema de circulação do ar aquecido. A eficiência do secador solar foi comparada com a secagem ao ar livre quanto ao tempo de secagem e qualidade da madeira.

Foram escolhidas árvores de 25 anos (aproximadamente) de modo aleatório, de 3 espécies distintas: *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*. De cada espécie, foram utilizadas 12 árvores. A madeira foi desdobrada por meio de uma serra-de-fita, sendo adotado o sistema de cortes tangenciais para a retirada das tábuas. As tábuas apresentaram dimensões de 2,5 x 15,0 x 280 cm (espessura, largura e comprimento).

Os processos de secagem em estufa solar e ao ar livre das madeiras selecionadas iniciaram-se simultaneamente nos dias 18 de maio (*Eucalyptus tereticornis*), 12 de julho (*Eucalyptus saligna*) e 4 de setembro de 2008 (*Corymbia citriodora*). Para cada método de secagem foi utilizada uma carga de madeira por espécie, sendo esta formada por 55 tábuas, totalizando 110 tábuas por espécie em estudo.

Desenvolveu-se um secador solar (Fig. 3.18), modelo *greenhouse*, apresentando capacidade para 1,0 m³ de madeira serrada. As dimensões do secador foram: 3,7 m de comprimento; 2,0 m de largura; 3,2 m de altura na parede sul e 1,0 m de altura na parede norte. A inclinação da estufa num ângulo igual a latitude do local possibilita o uso do secador solar durante todo o ano, de modo que seja possível a incidência dos raios solares perpendicularmente ao teto transparente.

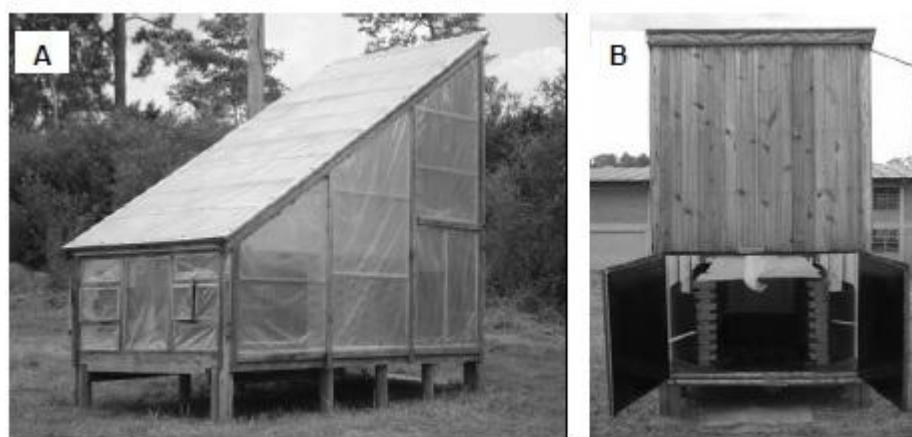


Figura 3.18 – Secador solar utilizado no estudo: vista da parede norte (A) e parede sul (B).

A orientação do secador solar foi no sentido norte-sul, de modo a aproveitar da melhor forma os raios solares a incidir no secador.

Para confecção do chão da estufa, foram utilizadas tábuas com 2,5 cm de espessura. A camada primária foi coberta com chapas de isopor de 2,0 cm e, por fim, foi colocada uma terceira camada, composta por chapas de compensado de 1,0 cm. Esse processo construtivo foi empregado com o intuito de se obter um isolamento térmico satisfatório, evitando ao mínimo as perdas de calor.

A parede sul, não estando exposta à incidência de luz solar, foi fabricada de modo semelhante ao chão, sendo que nessa parede, foram colocadas duas portas, com dimensões de 115 x 90 cm (altura x largura), para carga e descarga do material para análise.

As partes construídas de material sólido, parede sul e chão, foram nas suas superfícies internas pintadas com tinta a óleo preta, de modo a absorver a energia solar. Nas paredes restantes da estufa solar, utilizou-se uma dupla camada de PVC espaçadas por separadores de seção transversal de 2,0 cm², com objetivo de otimizar o isolamento térmico da câmara.

Na parede norte foram instaladas duas janelas, com dimensões de 25 x 25 cm, para permitir a renovação do ar no interior da estufa. Para a circulação do ar, utilizou-se um ventilador com 30 cm de diâmetro, movido por um motor elétrico trifásico de 0,5 HP, fixado no chão da estufa. A cada quatro dias, procedeu-se à inversão do fluxo de ar.

À volta da área de empilhamento da madeira foram construídas duas paredes vazadas de tijolos para direcionar o fluxo de ar e armazenar o calor. Para auxílio do direcionamento do fluxo de ar, foi instalada na chapa compensada, uma divisória de plástico PVC, cobrindo toda a extensão em comprimento da estufa utilizados quatro deflectores, pintados de preto, curvados de HDF (*High Density Fiberboard*) e colocados nos quatro cantos da estufa.

Para a secagem em estufa solar, os investigadores usaram uma pilha de madeira constituída por cinco colunas com 12 camadas cada. Em cada coluna colocou-se 4 a 5 camadas de tábuas servindo de peso para restrições mecânicas da pilha. Para a separação de cada camada foram utilizados cinco tabiques, livres de defeitos, com dimensões de 2,5 x 2,5 x 100 cm (espessura, largura e comprimento), dispostos a uma distância de 52 cm.

A secagem ao ar livre foi realizada a 15 m da estufa solar, para evitar variações climáticas nas duas metodologias de secagem, num local alto e plano, de boa drenagem e sem obstáculos à ventilação.

As tábuas foram empilhadas pelo método aplicado na secagem por estufa solar, apoiadas a 50 cm do solo por eucalipto tratado, orientados de norte para sul e cobertos por duas telhas de fibrocimento de 6,0 m de espessura.

A monitorização, mediante pesagens diárias, do teor de humidade durante a secagem foi realizada através de cinco amostras de controlo de cada carga, com 2,5x15x40 cm. Antes do início da secagem, determinou-se matematicamente (equação 3.4) o teor de humidade inicial de cada amostra de controlo.

$$TU_i = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3.4)$$

Em que:

TU_i - Teor de humidade inicial [%]

M_u - Massa húmida [g]

M_s - Massa seca [g]

O teor de humidade durante a secagem foi obtido através da equação 3.5:

$$TU_a = \frac{M_a(TU_i + 100)}{M_u} - 100 \quad (3.5)$$

Em que:

TU_a - Teor de humidade atual [%]

M_a - Massa atual [g]

As taxas de secagem para as amostras foram calculadas assim:

$$T_s = \frac{TU_i - TU_f}{t} \quad (3.6)$$

Em que:

T_s - Taxa de secagem [%/dia]

t - Tempo de secagem decorrido [dias]

Avaliaram-se os seguintes defeitos: fissuras (de superfície e de topo), empenamentos (arqueamento, encanoamento e encurvamento), colapso, tensões de secagem e contrações. O controlo dos defeitos de fissuras e empenamentos foi realizado em duas fases distintas, logo após o desmembramento da madeira e ao término do processo de secagem. Após a medição dos defeitos ocorridos durante a secagem, compararam-se os valores obtidos com aqueles apresentados na Norma para Classificação de Madeira Serrada de Folhosas (IBDF, 1983). Foram considerados os defeitos acima dos admitidos para a 4ª classe.

A determinação da presença e intensidade de colapso foi realizada por meio da remoção de alguns milímetros da superfície da tábua com uma desengrossadeira.

As tensões de secagem foram avaliadas mediante procedimentos descritos por Rasmussen (1961), sendo realizada uma avaliação preliminar após a secagem e uma final após climatização dos corpos de-prova em câmara (20°C de temperatura e 65% de humidade relativa).

Por fim, foram avaliadas as contrações radiais e tangenciais nas amostras de controlo utilizadas na monitorização do processo de secagem. Para a obtenção de dados precisos, antes e após a secagem foram demarcados, com lápis de anilina, os pontos de medições em todas as amostras. Mediante a relação entre a contração tangencial e radial obtêve-se o fator de anisotropia.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que para as três espécies estudadas, o teor de humidade final e o tempo de secagem na estufa solar foram menores que aqueles obtidos ao ar livre (Tabela 3.4). Em média as madeiras para a estufa solar demoraram metade do tempo para serem secas por comparação com a secagem ao ar livre.

Tabela 3.4 – Teor de humidade, tempo e taxa média de secagem em estufa solar e ao ar livre.

Espécie	Método	TU _i (%)	TU _f (%)	t (dias)	Ts (%/dia)
<i>Corymbia citriodora</i>	Solar	62,05	15,15	35	1,30
	Ar livre	60,02	20,71	58	0,68
<i>Eucalyptus saligna</i>	Solar	74,04	15,06	22	2,70
	Ar livre	75,62	20,75	33	1,66
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Solar	82,13	15,24	35	1,91
	Ar livre	73,58	20,30	104	0,51

Quanto à qualidade da madeira existem vários parâmetros de saída dos quais os investigadores retiraram várias conclusões.

O IRT é o índice de rachadura resultante do processo de secagem, e no final do processo segundo a Tabela 3.5 não se verificaram valores elevados, ficando abaixo de 5%. Para as espécies *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, observou-se uma tendência de aumento do IRT resultante da secagem em estufa solar em comparação com o processo realizado ao ar livre. Por sua vez, a espécie *Eucalyptus tereticornis* apresentou tendência contrária.

A presença de fissuras de superfície não causou grandes prejuízos na qualidade da madeira, considerando o seu uso estrutural, por causa das pequenas dimensões. Não se detetou diferença significativa entre os métodos de secagem em estufa solar e ao ar livre quanto à ocorrência de fissuras de topo.

Tabela 3.5 - Índice de fissuras de topo (IRT) médio e percentual de peças defeituosas.

Espécie	Método	Após desdobro		Após secagem		Diferença IRT médio
		IRT médio	% defeito	IRT médio	% defeito	
<i>Corymbia citriodora</i>	Ar livre	3,56	0,00	6,66	0,00	3,11
	Solar	4,99	1,82	8,37	5,46	3,38
<i>Eucalyptus saligna</i>	Ar livre	2,90	0,00	4,49	0,00	1,60
	Solar	4,11	0,00	5,88	1,82	1,77
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Ar livre	7,18	7,27	11,94	18,18	4,76
	Solar	6,63	7,27	10,66	12,73	4,04

A manifestação de peças arqueadas ao final da secagem é um dos defeitos mais problemáticos em relação ao seu controlo, uma vez que durante a secagem as tábuas ficam dispostas sem qualquer

restrição lateral que as impeça de deformarem presença de peças empenadas, nesse caso em especial o arqueamento, juntamente com as fissuras, são os principais defeitos incidentes na madeira seca em estufa solar.

Apesar das maiores percentagens de peças defeituosas no processo de secagem em estufa solar, ao analisar as médias das flechas de arqueamento, não foram observadas diferenças significativas entre os métodos de secagem para as três espécies estudadas (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 – Arqueamento (A) médio e percentual de peças defeituosas.

Espécie	Método	Após desdobro		Após secagem		Diferença A médio
		A médio	% defeito	A médio	% defeito	
<i>Corymbia citriodora</i>	Ar livre	2,59	3,64	2,81	10,91	0,22
	Solar	2,83	16,36	3,02	25,45	0,19
<i>Eucalyptus saligna</i>	Ar livre	2,87	20,00	3,08	23,64	0,21
	Solar	3,26	23,64	3,67	30,91	0,41
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Ar livre	2,88	20,00	3,13	30,91	0,24
	Solar	2,74	12,73	3,18	27,27	0,44

A madeira seca nos dois métodos apresentou no geral boa qualidade, evidenciando uma baixa incidência de peças com encurvamento (Tabela 3.7) e ausência de defeitos como encanoamento e colapso (No entanto, a realização de processos de secagem suave, com retirada lenta do conteúdo de humidade da madeira, como ocorre nos métodos de baixa temperatura ($< 50^{\circ}\text{C}$), proporciona a ausência do defeito de colapso, conforme verificado nesse estudo).

Tabela 3.7 – Encurvamento médio e percentual de peças defeituosas.

Espécie	Método	Após desdobro		Após secagem		Diferença E médio
		E médio	% defeito	E médio	% defeito	
<i>Corymbia citriodora</i>	Ar livre	2,01	1,82	2,03	0,00	0,02
	Solar	2,08	1,82	1,77	1,82	-0,31
<i>Eucalyptus saligna</i>	Ar livre	1,82	1,82	1,67	0,00	-0,15
	Solar	1,49	1,82	1,53	0,00	0,04
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Ar livre	2,06	9,09	1,57	1,82	-0,49
	Solar	1,94	5,45	1,50	0,00	-0,44

As tábuas secas em estufa solar apresentaram grande propensão ao desenvolvimento de tensões de secagem. A presença de peças com endurecimento superficial provavelmente pode ser atribuída à ausência de condicionamento no final da secagem, tratamento possível somente em processos controlados como a secagem em estufa convencional (ver Tabela 3.8).

Tabela 3.8 – Percentagem de peças com tensões de secagem em estufa solar e ao ar livre.

Espécie	Método	Após secagem			Após climatização-24h		
		Forte	Suave	Normal	Forte	Suave	Normal
<i>Corymbia citriodora</i>	Ar livre	0,00	40,00	60,00	100	0,00	0,00
	Solar	63,64	30,91	5,45	96,36	1,82	1,82
<i>Eucalyptus saligna</i>	Ar livre	0,00	80,00	20,00	96,36	3,64	0,00
	Solar	7,27	61,82	30,91	100	0,00	0,00
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Ar livre	36,36	63,64	0,00	100	0,00	0,00
	Solar	54,55	45,45	0,00	100	0,00	0,00

3.2.10 MICHALEWICZ ET AL (2003) “ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE SECAGEM DE PLACAS DE GESSO: ESTUDO PARAMÉTRICO ”

Neste estudo foram investigadas as melhores condições de secagem dos produtos manufaturados de gesso tomando como base de estudo a secagem de placas pré-moldadas.

Entre outros, será investigada a influência da temperatura e velocidade do ar no tempo de secagem, assim como a melhor distância necessária entre as placas durante o processo de secagem. Os dados experimentais serão futuramente utilizados também para calibrar e validar os modelos matemáticos propostos, de forma a contar com uma ferramenta de análise rápida e eficiente. É também objetivo fazer a transferência dos resultados desta pesquisa aos produtores da região, contribuindo dessa maneira para melhoria dos processos de secagem.

As amostras resultaram da mistura de gesso em pó com água (a proporção de água com gesso foi de 1,5/2,75), segundo a norma NBR 12128 (1991). A pasta, depois de pronta, foi colocada num molde.

As placas de gesso para análise tinham dimensões de 60x60cm (altura x largura) com espessura variável na placa devido ao seu formato construtivo. Foi escolhido para análise o valor da espessura mais alto porque teoricamente este corresponderia à zona que mais tempo demoraria a secar (3 cm de espessura).

A placa foi colocada num túnel de vento com condições que simulem a secagem ao ar livre. O esquema de montagem está representado na Fig.3.19.

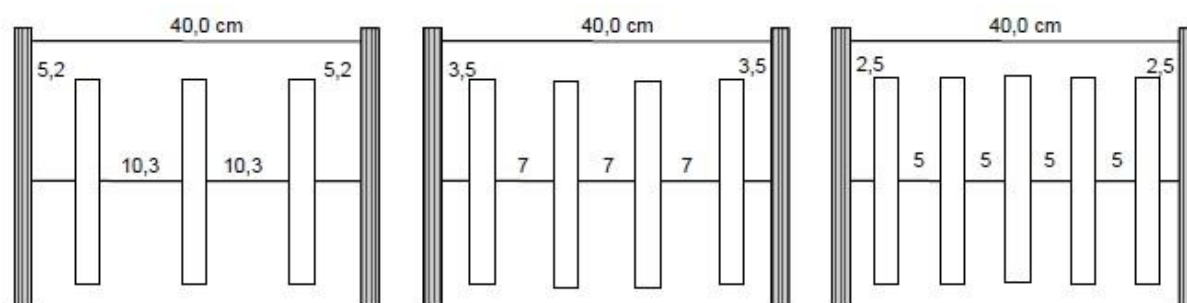


Figura 3.19 – Arranjo das placas na seção de teste do túnel de vento.

Apenas uma placa foi monitorizada. Todas as placas receberam duas hastes presas a uma base, sendo que a monitorizada ficou acima de uma balança de pesagem e as restantes foram fixas no corpo do túnel para ficarem rígidas no seu lugar.

O túnel, com um comprimento de 6m, foi dimensionado segundo as normas ISSO 5801 (1997). Foi construído a partir de madeira do tipo compensado naval (elemento de baixa higroscopicidade) e revestido por isolamento térmico “isopor” (Fig.3.20).

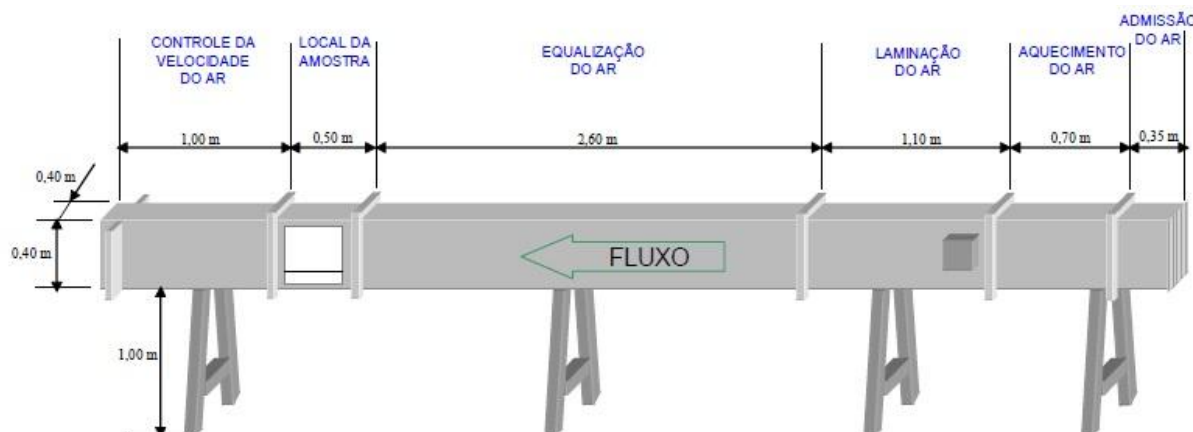


Figura 3.20 – Esquema do túnel de vento e as diferentes secções.

O escoamento do ar foi obtido através de um ventilador de seis pás com diâmetro total de 375 mm acionado por um motor de 1/20 CV com rotação de 1700 rpm. Foi utilizado um conjunto de três resistências elétricas numa potência de 8 KW para o aquecimento do ar. Na entrada do ar foi colocada uma grade de proteção, para evitar acidentes ou a aspiração indesejada de elementos que possam causar dano.

Durante os ensaios foram medidas as temperaturas internas da placa de gesso, a temperatura e humidade do ar antes e depois das placas na seção de teste, velocidade do ar insuflado e o peso da placa de gesso a cada instante de tempo para monitorar a taxa de remoção de humidade.

Nas medições de temperatura da placa de gesso foram utilizados termopares. Para as medições de temperatura e humidade relativa do ar no túnel, foram utilizados dois sensores tipo capacitivo, para as medições de temperatura e humidade relativa do ar ambiente no laboratório foi utilizado um higrotermógrafo. Para as medições de peso foi utilizada uma balança digital e para as medições de velocidades, foi utilizado um anemômetro digital. Os dados da balança e do higrotermógrafo foram capturados por uma câmara digital, em intervalos de 10 min, para posteriormente serem transcritos para cálculo.

A simulação foi concebida em função do teor de humidade inicial e final das placas, como também a movimentação da humidade durante o processo de secagem. Os investigadores, decidiram trabalhar com a humidade na base seca (equação semelhante a 3.4).

Foram consideradas nas simulações, todas as variáveis que pudessem influenciar a humidade, tais como: a distância entre as placas, humidade relativa do ar, temperatura do ar e pressão no túnel.

Também foi decidido investigar o comportamento da temperatura no interior da placa visando a análise da transferência de calor e massa.

Para gerar um banco de dados que permitisse uma análise confiável da simulação, foi traçado o seguinte plano de experimentos:

- Variar a distância entre placas, em 5, 7 e 10 cm, com o uso de 5,4 e 3 placas respectivamente;
- Variar a temperatura de secagem, em 50, 65 e 80 °C;
- Variar a velocidade do ar nas placas, em 1 e 2 m/s.

Estas três condições foram permutadas entre si, perfazendo um total de 18 simulações. Os dados foram capturados por um “Logger” e uma “Webcam”, ambos ligados a um computador.

Após a colheita dos dados, foram levantadas curvas para:

- Humidade da placa vs. Tempo;
- Taxa de secagem vs. Tempo;
- Temperatura interna da placa versus Tempo.

Os resultados experimentais foram ainda comparados com os de um modelo teórico. Considerando que existem dois períodos de secagem distintos, o constante e o de queda, utilizaram-se duas equações diferentes.

$$T_I = \frac{m_s}{Aw_{di}} (X_I - X_{cr}) \quad (3.7)$$

$$T_{II} = \frac{4d^2}{D\pi^2} \ln \left(\frac{X_{cr} - X_{eq}}{X - X_{eq}} \right) \quad (3.8)$$

Em que:

T_I - Tempo de secagem para o período constante [s]

m_s - Massa seca do gesso [kg]

A - Área da secagem [m²]

X_I - Teor de humidade no período constante [kg/kg]

X_{cr} - Teor de humidade crítico [kg/kg]

D - Coeficiente de difusão [m²/s]

T_{II} - Tempo de secagem para o período de queda [s]

X_{eq} - Teor de humidade em equilíbrio [kg/kg]

X - Teor de humidade no momento [kg/kg]

Os investigadores concluíram que o tempo de secagem, como seria de esperar, diminui com o aumento da temperatura (Fig 3.21), no entanto, pela análise do gráfico verifica-se que o incremento na temperatura não apresenta uma relação linear com o tempo de secagem (a curva dos 65 °C está mais próxima dos 80 °C que dos 50 °C). O aumento excessivo da temperatura não provoca reduções do tempo de secagem na mesma proporção.

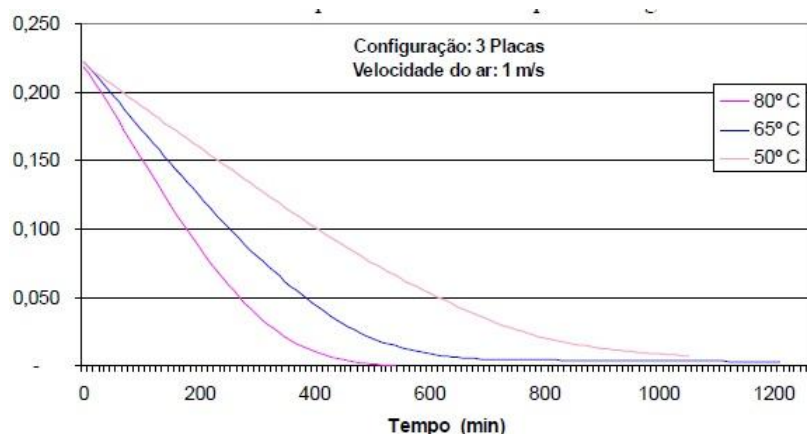


Figura 3.21 – Variação da humidade pelo tempo de secagem.

Pela Fig 3.22, conclui-se que a distância entre placas não influencia significativamente o tempo de secagem. A Fig 3.23 mostra esse efeito onde as retas representadas não variam significativamente, sendo quase horizontais.

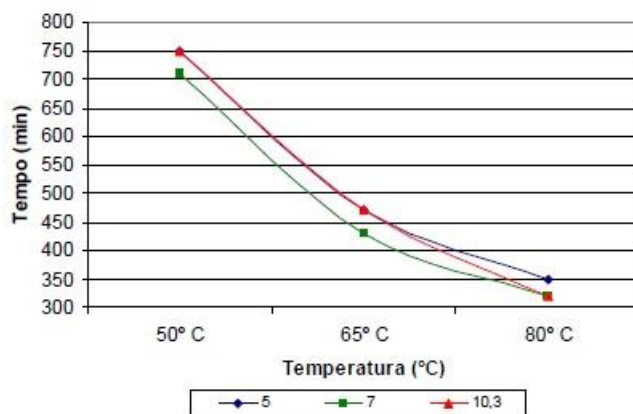


Figura 3.22 – Efeito da temperatura sobre o tempo de secagem.

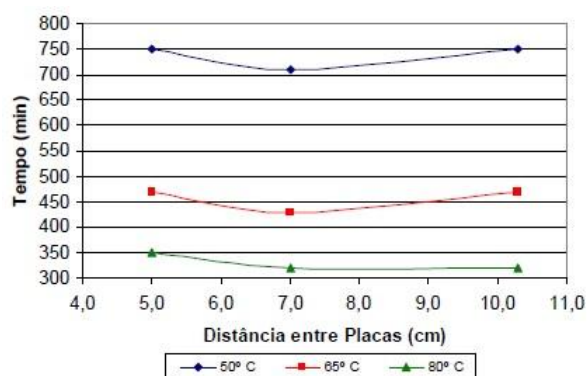


Figura 3.23 – Efeito da distância entre placas sobre o tempo de secagem

Nas secagens realizadas foi possível observar que as curvas de secagem e da taxa de secagem, apresentam características similares com as obtidas na literatura, muito embora essa seja uma comparação qualitativa, uma vez que não se encontrou bibliografia com dados sobre a secagem de placas de gesso.

Tabela 3.9 – Cálculos dos tempos de secagem.

Temperatura (°C)	Tempo de secagem (h)			
	Modelo matemático			Simulação
	T_I	T_{II}	Total	
80	1,14	4,00	5,14	4,93
65	1,56	4,90	6,46	6,91
50	2,62	7,55	10,19	11,08

3.2.11 HASELEIN E SANTINI (2003) “EFEITO DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR SOBRE A TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE *PINUS ELIOTTI ENGELM*”

O objetivo deste artigo foi avaliar o efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem, em peças de madeira do tipo *Pinus elliottii*, bastante usada na construção civil.

Foram preparadas peças de madeira com 25x125x750 mm. No momento de corte das peças de madeira retirou-se das extremidades das amostras secções com 2,5 cm de largura com o intuito de determinar o teor de humidade inicial (TU_i). O peso húmido inicial (P_i) foi obtido através de uma balança mecânica. TU_i e P_i foram as variáveis indispensáveis para o cálculo do teor de humidade (TU) ao longo do processo de secagem.

A secagem foi realizada numa estufa, aquecida por um permutador de calor e com circulação forçada de ar. As condições internas foram geridas por um software adaptado para o efeito.

No total oito amostras de madeira foram submetidas à secagem. Para a temperatura de 50°C testou-se quatro cargas, sendo que duas secaram a uma velocidade de 2,3 m/s e as outras duas a 5 m/s. O mesmo processo foi utilizado para uma temperatura de 110°C. Os resultados das velocidades foram confirmados por um anemómetro digital. A taxa de secagem foi obtida pela relação da percentagem de água evaporada com o tempo de secagem decorrido.

Pela análise da Fig. 3.24 e como conclusão percebe-se que o efeito do aumento da velocidade do ar de secagem é significativo para altas temperaturas, sendo que para baixas temperaturas esse aumento é irrelevante.

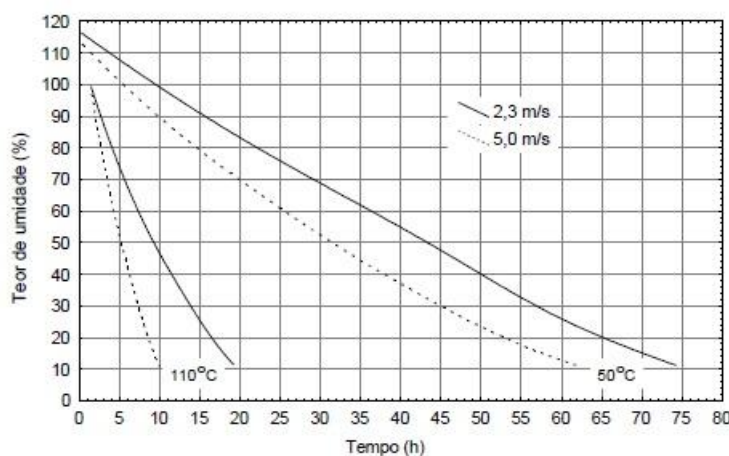


Figura 3.24 – Curvas de secagem elaboradas para duas temperaturas de secagem e duas velocidades de ar.

A taxa de secagem mostrou uma relação diretamente proporcional com a temperatura, velocidade do ar e teor de humidade da madeira. A taxa de secagem foi praticamente o dobro para a velocidade de 5 m/s comparando com a velocidade de 2,3 m/s, para uma temperatura de 110°C (Fig. 3.26).

A influência da velocidade do ar sobre a taxa de secagem foi decrescente à medida que o teor de humidade diminui, sendo insignificante a baixa temperatura. Este facto está relacionado com o efeito da humidade do ambiente na transferência de calor. A transferência de calor para a superfície aumenta à medida que aumenta a humidade do ar.

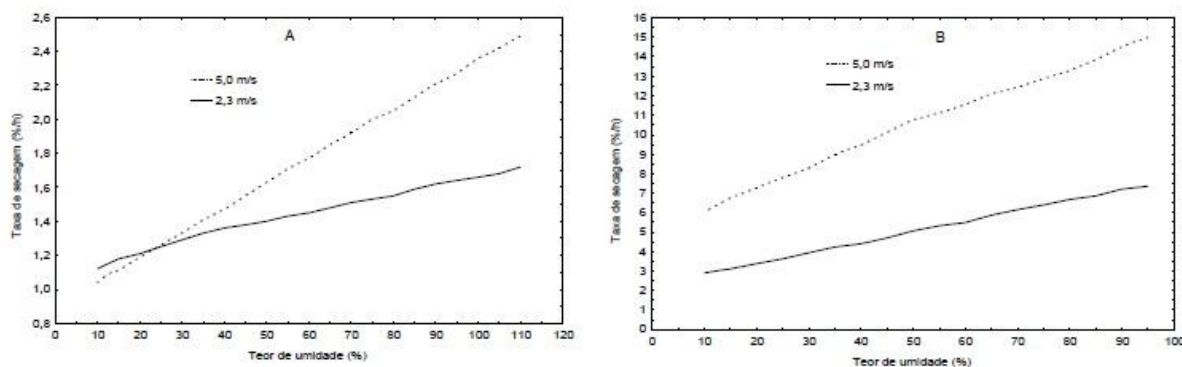


Fig.3.25 – Influência da velocidade do ar na taxa de secagem durante a remoção da humidade da madeira à temperatura de 50°C (A) e 110°C (B).

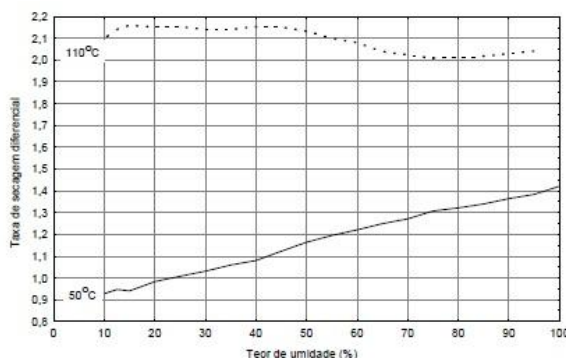


Fig.3.26 – Razão entre as taxas de secagem calculadas para as velocidades de ar de 5,0 e 2,3 m/s em função do teor de humidade da madeira, nas temperaturas de 50°C e 110°C.

3.3. SÍNTESE DOS ARTIGOS ANALISADOS

Vários parâmetros foram analisados. Verificou-se que um aumento da velocidade e temperatura do ar provocam um aumento da velocidade de secagem e consequente diminuição do tempo de secagem. Por sua vez um aumento da humidade relativa do ar provoca um aumento do tempo de secagem.

As características dos materiais influenciam a cinética de secagem, a porosidade, a ligação e conectividade entre os poros, a tortuosidade e orientação e a espessura são parâmetros dos materiais e a sua variação implica uma alteração do tempo de secagem.

Diferentes métodos e mecanismos de secagem influenciam o rendimento da secagem e os danos nos materiais causados por este processo. Para a madeira a estufa solar apresenta melhores resultados a nível do rendimento. Para a argila a secagem por micro-ondas apresenta-se como a melhor solução tanto a nível de rendimento como minimização dos danos causados pela secagem.

4

CONCLUSÕES

4.1. CONCLUSÕES FINAIS

Surgiram, nas últimas décadas, artigos científicos onde se analisaram vários fatores sempre com o intuito de melhorar o processo de secagem. Pela análise geral desses artigos, conclui-se que as investigações incidem sempre sob a avaliação do comportamento da cinética de secagem de um determinado material sob circunstâncias específicas com a intenção de avaliar a influência que estas têm no processo.

Da análise dos artigos conclui-se que as características dos materiais que influenciam e condicionam a cinética de secagem são: porosidade e porometria (tamanho e teor de agregados), grau de conectividade dos poros, tortuosidade e orientação dos poros, permeabilidade, higroscopicidade, presença de aditivos e espessura.

A porosidade e a porometria são um parâmetro do material que influencia a secagem. É através dos poros que se processa a circulação da água e vapor. Analisando os artigos é consensual que quanto maior for a abertura dos poros mais uniforme e rápida será a cinética de secagem, desde que as condições de ligação entre os materiais sejam as mesmas.

Conclui-se também que a conectividade dos poros favorece a transferência de humidade e consequentemente a velocidade com que o material expulsa a água. A conectividade pode ser afetada pela orientação e tortuosidade dos poros. Os artigos concluem que uma maior orientação e menor tortuosidade favorecem a ligação entre os poros.

Outro fator que pode influenciar a conexão da matriz porosa de um material é inclusão de aditivos na composição de um determinado material. Estes aditivos normalmente favorecem e reforçam a ligação entre os poros diminuindo assim o tempo de secagem. Uma matriz com uma porosidade mais pequena pode através da inclusão de um aditivo obter melhores resultados por comparação com uma matriz com poros mais abertos mas sem o reforço da sua conectividade.

A variação das condições da secagem foi outro fator importante de análise por parte dos investigadores. As condições podem ser variadas através da velocidade do ar, temperatura do ar e a humidade relativa do ar. Como seria expectável, um incremento da velocidade ou da temperatura do ar favorece a otimização do tempo de secagem. Por sua vez, um aumento da humidade relativa atrasa a cinética de secagem. Os investigadores concluíram que o aumento de temperatura, a partir de determinados limites, não provoca reduções do tempo de secagem na mesma proporção. O efeito da velocidade do ar é significativo para altas temperaturas sendo irrelevante para baixas temperaturas, pois a transferência de calor para a superfície aumenta à medida que aumenta a humidade do ar. A influência da velocidade do ar sobre a taxa de secagem, diminui à medida que o teor de humidade

diminui, que corresponde ao período de queda da secagem. Importa referir que estas conclusões das condicionantes de cinética de secagem não podem ser consideradas para todos os materiais, uma vez que os artigos apenas abordaram alguns materiais, não sendo assim possível afirmar que estas variações ocorrem para todo o tipo de material.

Concluiu-se que as consequências do processo de secagem nos materiais são: contração, arqueamento, deformação e fissuração. Os investigadores analisaram algumas soluções que permitem minimizar estas consequências. A contração depende das condições de secagem (velocidade e temperatura do ar e humidade relativa) e não só do teor de humidade do material (os artigos apenas incidiram na argila).

As fissurações e as deformações podem ser evitadas através da inclusão de aditivos, que favorecem a coesão mecânica dos materiais. Como mecanismo de secagem, desde que seja adequado, deverá ser escolhido como método a secagem por micro-ondas (para a secagem da argila). Esta solução de secagem rápida e uniforme reduz o tempo de processamento, a energia consumida, e aumenta a produtividade e a relação custo/performance está mais otimizada.

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A análise destes artigos permite retirar algumas conclusões sobre a influência dos parâmetros, métodos e mecanismos no processo de secagem. Com o intuito de melhorar e otimizar esse processo seria interessante fazer um levantamento maior de mais artigos, dividindo a pesquisa por material, por parâmetro e por equipamento usado. Assim seria possível perceber não só como varia a cinética de secagem em função das suas condicionantes, mas também entender qual a condicionante mais influente durante o processo de secagem.

Poderão ainda ser realizados ensaios e através dos resultados laboratoriais confirmar as conclusões retiradas da análise dos artigos.

Esta dissertação poderá servir como base para estes desenvolvimentos futuros.

Fazer ensaios através de resultados laboratoriais confirmar

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mujundar, A.S. *Handbook of Industrial Drying*. Taylor & Francis, New York, 2007
- [2] Mujundar, A.S. *Industrial Transfer Process*. Department of Mechanical Engineering National University of Singapore, 2011-2012
- [3] Williams-Gardner, A. *Industrial drying*. George Godwin, London, 1971
- [4] Freitas, Vasco Peixoto de, Torres, M. I. M., Guimarães, Ana. *Humidade Ascensional*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto, 2008
- [5] Rato, V. *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Dissertação de Doutoramento. FCT/UNL, Lisboa, 2000.
- [6] Freitas, V. *Transferência de humidade em paredes de edifícios - análise do fenómeno de interface*. Dissertação de Doutoramento. Universidade do Porto, Porto, 1992
- [7] Lienhard IV, J. H, Lienhard V, J.H. *A heat transfer textbook*, Dover Publications, Inc, Mineola, 2011.
- [8] Park, K.J. et al, *Secagem :Fundamentos e equações*, Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, 2014, v.16,n.1,p.93-127, ISSN 1517-8595, Campina Grande
- [9] Freitas, Vasco Peixoto de, Pinto, Paulo da Silva. *Permeabilidade ao vapor de materiais de construção-Condensações internas*. Laboratório de Física das Construções. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto, 2000.
- [10] Castro, J. M. F., *Estudo Experimental da Secagem do Betão Celular*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1998
- [11] Van Brackel, J. *Mass Transfer in Convective Drying*. Advances in Drying, 1980, p.217-267, Mujundar A.S Washington Hemisphere Publishing Corporation.
- [12] Junior, P.C, Corrêa, P.C. *Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 1999, v.3,n.3,p.349-353, Campina Grande
- [13] Moropoulou, A., et al. *Drying Kinetics of Some Building Materials*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2005, v. 22, n. 2, p.203-08.
- [14] Crank, J. *The Mathematics of Diffusion, 2nd Edn*. Clarendon. New York, 1975.
- [15] Toğrul, İ.T, Pehlivan, D. *Modelling of Drying Kinetics of Single Apricot*. Journal of Food Engineering, 2003, v.58, n. 1, p.23-32.
- [16] Taheri-Garavand, A., et al. *Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Tomato Influence of Air Dryer Conditions*. International Transaction Journal of Engineering, Management & Applied Sciences & Technologies 2, 2011, n.2.
- [17] Hii, C.L, et al. *Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Cocoa Beans During Artificial and Natural Drying*. Journal of Engineering Science and Technology 3, 2008, n. 1,p. 1-10.
- [18] Guiné, R. *Analysis of the Drying Kinetics of S. Bartolomeu Pears for Different Drying Systems*. (2010).

- [19] Panchariya, P.C, et al. *Thin-Layer Modelling of Black Tea Drying Process*. Journal of food engineering 52, 2002, n. 4, p.349-57.
- [20] Kuitche, A et al. *Influence of Pre-Treatment on Drying on the Drying Kinetic of a Local Okro (Hibiscus Esculentus) Variety*. World Journal of Dairy & Food Sciences 2, 2007, n. 2,p.83-88.
- [21] Martinazzo, A.P, et al. *Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2007, v.11,n.3,p.301-306, Campina Grande
- [22] ROBERTS, J. S., et al. *Drying Kinetics of Grape Seeds*. Journal of Food Engineering 89, 2008, p. 460-465.
- [23] TAHERI-GARAVAND, A et al., *Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Tomato Influence of Air Dryer Conditions*, International Transaction Journal of Engineering, Management, et Applied Sciences et Technologies, 2011, p. 147-160.
- [24] <http://www.chinafertilizerunit.com/2d-rotary-dryer.html>. Acesso em 2015
- [25] Silva,S.R.B. *Processamento de frutos e hortaliças por secagem- desidratação e liofilização- Processamento de alimentos de origem vegetal*, Brasil, 2012
- [26] <http://www.gea.com/global/en/index.jsp>. Acesso em 2015
- [27] <http://www.promasjetmill.com/vacuum-tray-dryers.html>. Acesso em 2015
- [28] <http://freezedrying.com/bench-top-freeze-dryer> Acesso em 2015
- [29] Coutinho, A.S – *Fabrico e propriedades do betão*. Volume 1 Laboratório Nacional de Engenharia Civil 1988
- [30] Bardella, P. et al “Sistemas de cura em concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno com utilização de sílica ativa” (2005)
- [31] <http://www.madeidura.com/procedimentos-industriais/secagem-da-madeira>. Acesso em 2015
- [32] http://www.mill.com.br/caldeiras_estufas.php. Acesso em 2015
- [33] http://www.mill.com.br/caldeiras_secagem.php. Acesso em 2015
- [34] Bogas,J.A. *Materiais cerâmicos – Materiais de construção*- Técnico de Lisboa, 2003
- [35] Magalhães Baltar, C.A. et al, “Gipsita- Capítulo 21”, *CT 2005-122-00-Comunicação técnica elaborada para Edição do livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e especificações*, Pag 449 a 470,Rio de Janeiro, Novembro de 2005, CETEM- Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da ciência e tecnologia
- [36] Malab, S., et al. *Drying kinetics of self-compacting concrete*. Turkish J. Env. Sci. Engineering, 2009, v. 33, p.135-145.

- [37] Krus, M., Holm, A. *Simple methods to approximate the liquid transport coefficients describing the absorption and drying*. Proceeding of the 5th Symposium “Building Physics in the Nordic Countries”, Gotemburgo, 1999, p.241-248.
- [38] Hasatani, M. *Contraction characteristics of molded ceramics during drying*. Drying technology, 1993, v.11, n.4, p.815-830.
- [39] Itaya, Y. *Drying enhancement of clay slab by microwave heating*. Proceedings of the 14th International Drying Symposium, 2004, v.A, p.193-200.São Paulo
- [40] ASAMI, S. *Drying of fine ceramics*. Drying technology, 1993, v.11, n.4, p.733-747.
- [41] Branco, F.G. *Avaliação experimental do tempo de secagem de argamassas de agregados leves*,Coimbra, 2007
- [42] Innocentini, M.D.M. *Efeito da distribuição granulométrica na secagem de betão refratário*.Brasil, 2003
- [43] Stangerlin, D., et al. *Uso de estufa solar para a secagem de madeira serrada*. Ciência Florestal, 2009, v. 19, n. 4, p. 461-472, Santa Maria
- [44] Michalewicz,J.S *Análise experimental do processo de secagem de placas de gesso: estudo paramétrico*. Universidade Federal de Pernambuco.2003
- [45]Santini, E.J., Haselein, C.R. *Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de pinus eliotti engelm*. Ciência Florestal,2009, v. 12, n. 2, p. 99-106, Santa Maria

